

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут «Фізико-технічний факультет»

Кафедра матеріалів реакторобудування та фізичних технологій

До захисту допущено
кафедрою матеріалів реакторобудування та фізичних технологій,
протокол № 5 / 2025-2026 від 15 грудня 2025 р.

завідувач кафедри


(підпис)

Сергій ЛИТОВЧЕНКО

(ім'я, прізвище)

«15» грудня 2025 р.

Кваліфікаційна робота
здобувача другого (магістерського) рівня вищої освіти

**«Фізичні механізми й астрономічні прояви
космічного вивітрювання.»**

**«Physical mechanisms and astronomical
manifestations of space weathering»**

Спеціальність 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

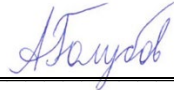
Освітня програма «Прикладна фізика»

Виконавець



Андрій ПАНАСЮК

Науковий керівник:



д. ф.-м. н. Олексій ГОЛУБОВ.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена узагальненню фізичних механізмів космічного вивітрювання та їхнього впливу на хімічні, морфологічні й спектральні властивості поверхонь безатмосферних тіл Сонячної системи. Дослідження зосереджене на взаємодії сонячного вітру, мікрометеоритного потоку та галактичного космічного випромінювання, що разом визначають еволюцію верхніх шарів реголіту.

Об'єктом дослідження є процеси космічного вивітрювання, предметом — механізми зміни мінерального складу, мікроструктури й оптичної відповіді реголіту. Мета роботи полягає у систематизації цих механізмів та визначенні їхньої синергії для коректної інтерпретації дистанційних спостережень.

Методологія охоплює аналіз місячних й астероїдних зразків, лабораторні моделювання (іонне бомбардування, лазерні імпульси, УФ-опромінення у вакуумі), спектральні та зображувальні дані місій Galileo, Clementine, LRO, Hayabusa й OSIRIS-REx, а також теоретичні моделі.

Установлено, що сонячний вітер спричинює аморфізацію та редукцію заліза, мікрометеоритні удари — локальне плавлення й утворення аглютинатів, а космічні промені — глибинну радіаційну модифікацію. Це приводить до формування «зрілого» реголіту зі зниженим альбедо, спектральним почервонінням і приглушеними силікатними смугами. Нанофазне залізо (npFe^0) визначено головним чинником цих оптичних змін, тоді як реголітарний гарденінг регулює темп їх накопичення.

Наукова новизна полягає у створенні комплексної рамки, що поєднує мікрофізичні механізми й спектральні прояви та систематизує індикатори оптичної зрілості.

Ключові слова: космічне вивітрювання, реголіт, нанофазне залізо, сонячний вітер, мікрометеоритні удари, аглютинати, аморфізація, спектральні індекси, зрілість поверхні.

ABSTRACT

The qualification thesis is devoted to the generalization of the physical mechanisms of space weathering and their influence on the chemical, morphological, and spectral properties of the surfaces of airless bodies of the Solar System. The study focuses on the interaction of the solar wind, the micrometeoroid flux, and galactic cosmic radiation, which together determine the evolution of the upper layers of the regolith.

The object of the research is the processes of space weathering, and the subject is the mechanisms of changes in the mineral composition, microstructure, and optical response of the regolith. The aim of the work is to systematize these mechanisms and to identify their synergy for the correct interpretation of remote observations.

The methodology includes the analysis of lunar and asteroid samples, laboratory simulations (ion bombardment, laser pulses, UV irradiation in vacuum), spectral and imaging data from the Galileo, Clementine, LRO, Hayabusa, and OSIRIS-REx missions, as well as theoretical models.

It has been established that the solar wind causes amorphization and iron reduction, micrometeoroid impacts cause localized melting and the formation of agglutinates, and cosmic rays cause deep radiation modification. This leads to the formation of “mature” regolith with reduced albedo, spectral reddening, and attenuated silicate bands. Nanophase iron (npFe^0) is identified as the main factor behind these optical changes, while regolith “gardening” regulates the rate of their accumulation.

The scientific novelty lies in the creation of a comprehensive framework that combines microphysical mechanisms and spectral manifestations and systematizes indicators of optical maturity.

Keywords: space weathering, regolith, nanophase iron, solar wind, micrometeoroid impacts, agglutinates, amorphization, spectral indices, optical maturity.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ФІЗИЧНІ МЕХАНІЗМИ КОСМІЧНОГО ВИВІТРЮВАННЯ.....	7
1.1. Визначення явища та історичний огляд досліджень.....	7
1.2. Вплив сонячної радіації та плазми: механізми іонної імплантації.....	13
1.3. Вплив мікрометеоритного бомбардування та ударні процеси.....	17
1.4. Хімічні та спектральні наслідки вивітрювання	20
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИВІТРЮВАННЯ	25
2.1. Лабораторне моделювання космічного вивітрювання.....	25
2.2. Дослідження зразків, доставлених з поверхні космічних тіл.....	31
2.3. Дистанційні спектральні методи реєстрації проявів вивітрювання	33
2.4. Вплив вивітрювання на поверхні космічних апаратів та інженерні аспекти	36
РОЗДІЛ 3. ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ ПРОЯВІВ КОСМІЧНОГО ВИВІТРЮВАННЯ НА РІЗНИХ ТИПАХ НЕБЕСНИХ ТІЛ.....	39
3.1. Вивітрювання на силікатних тілах внутрішньої Сонячної системи.....	39
3.2. Вивітрювання на астероїдах: залежність від складу та орбітальної динаміки..	43
3.3. Вивітрювання на малих тілах біля Марса	47
3.4. Класифікація вивітрених поверхонь та перспективи досліджень	51
ВИСНОВОК	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57

ВСТУП

Актуальність дослідження. Космічне вивітрювання є одним із ключових процесів, що визначають еволюцію поверхонь безатмосферних тіл Сонячної системи. Під дією сонячного вітру, мікрометеоритного потоку та космічного випромінювання верхні шари реголіту зазнають мінералогічних і спектральних змін, які суттєво впливають на їхній вигляд та фізичні властивості. Оскільки інформація про склад і стан поверхонь Місяця, астероїдів та Меркурія здебільшого надходить із дистанційного зондування, коректна інтерпретація спектральних даних потребує ґрунтового розуміння механізмів вивітрювання.

Незважаючи на значний прогрес у вивченні реголіту, низка питань залишається відкритою: темпи накопичення спектральної «зрілості», роль нанофазного металевого заліза, взаємодія ударних і радіаційних процесів та межі застосування існуючих моделей. Нові дані місій LRO, Hayabusa2 та OSIRIS-REx засвідчили більшу складність спектральних варіацій, ніж припускали традиційні підходи, що посилює потребу в уточненні фізичних механізмів вивітрювання.

Об’єкт дослідження — процеси космічного вивітрювання на поверхнях безатмосферних тіл.

Предмет дослідження — зміни мінерального складу, структурних властивостей і оптичної відповіді реголіту під дією сонячного вітру, мікрометеоритного бомбардування та космічної радіації.

Мета роботи — систематизувати провідні механізми космічного вивітрювання та окреслити їхні спектральні й хімічні прояви для інтерпретації дистанційних спостережень.

Завдання дослідження:

— дослідити вплив сонячного вітру на структуру, склад і оптичні властивості поверхневого реголіту.

- охарактеризувати мікрометеоритні процеси — плавлення, випаровування та формування аглютинатів.
- визначити роль галактичного космічного випромінювання у глибинних радіаційних модифікаціях реголіту.
- узагальнити механізми утворення нанофазного металевого заліза та його вплив на спектральні характеристики поверхні.
- проаналізувати процеси реголітарного гарденінгу та їхній вплив на темпи накопичення зрілості реголіту.
- підготувати інтегровану модель фізичних механізмів космічного вивітрювання, придатну для інтерпретації даних космічних місій.

У роботі застосовано **комплексний підхід**, що поєднує результати космічних місій, лабораторних моделей і теоретичних досліджень. Порівняння спектроскопічних даних Місяця й астероїдів дозволило виокремити спільні риси їхньої оптичної еволюції. Аналіз експериментальних даних про іонне опромінення, лазерні моделювання ударів і високотемпературні процеси дав змогу відтворити основні механізми формування структурних дефектів та нанофазного заліза

Наукова новизна полягає в комплексному підході до вивчення космічного вивітрювання як взаємопов'язаної системи процесів. Уточнено роль іонного опромінення та мікрометеоритних ударів у формуванні оптичних властивостей, узагальнено морфологічні форми нанофазного заліза та їхній вплив на спектральні характеристики, а також систематизовано індикатори ступеня вивітрювання.

Практична значущість полягає у можливості застосування результатів для аналізу даних орбітальних і роботизованих місій. Отримані висновки дозволяють точніше визначати мінеральний склад і зрілість поверхонь, уточнювати інтерпретаційні моделі та планувати лабораторні експерименти. Це сприяє реконструкції геологічної історії та моделюванню еволюції поверхневих шарів безатмосферних тіл.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ФІЗИЧНІ МЕХАНІЗМИ КОСМІЧНОГО ВИВІТРЮВАННЯ

1.1. Визначення явища та історичний огляд досліджень

Космічне вивітрювання (КВ) — це комплекс фізико-хімічних процесів, що відбуваються на поверхнях безатмосферних або майже безатмосферних тіл Сонячної системи (Місяць, Меркурій, багато астероїдів і супутників). Відсутність газової оболонки, гідродинамічного транспорту та ефективних магнітних щитів призводить до того, що поверхні цих об'єктів постійно піддаються дії високоенергетичних агентів космічного середовища. Сукупна дія цих чинників поступово змінює:

- мінералогічний склад верхніх шарів реголіту;
- кристалічну структуру зерен;
- оптичні та спектральні властивості поверхні;
- фізичні параметри (зокрема, пористість, гранулометрію, стан поверхневих плівок) [4, с. 616].

До основних агентів, що визначають інтенсивність і характер КВ, належать (Рис. 1.1.) [35]:

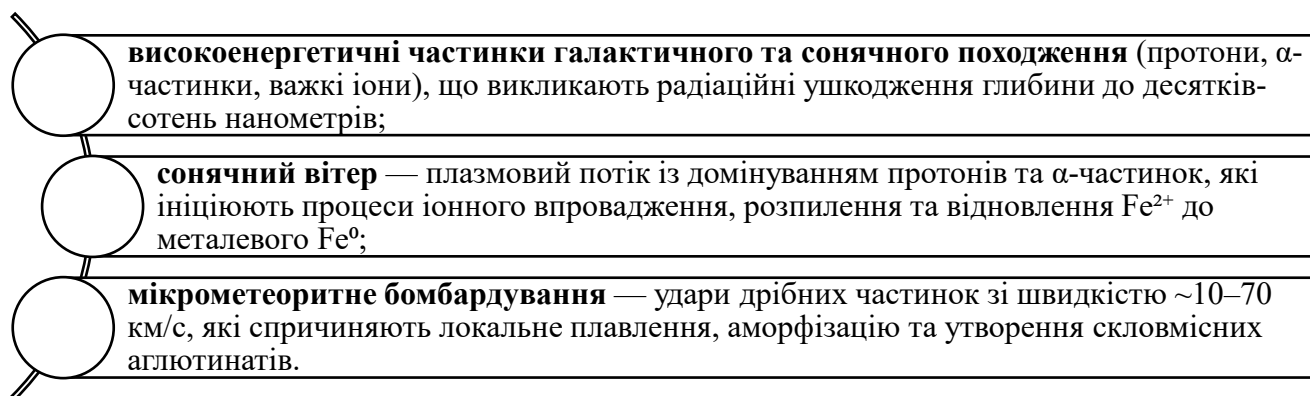


Рисунок 1.1. Агенти, що визначають інтенсивність і характер КВ

У результаті цих впливів у поверхневому шарі реголіту формується так звана патина — тонка ($\sim 10\text{--}200$ нм) модифікована оболонка на мінеральних зернах,

збагачена нанофазним металевим залізом (npFe^0). Наявність npFe^0 є ключовим чинником, що визначає спектральні зміни: потемніння альbedo, червоніння спектру відбиття, приглушення діагностичних смуг поглинання олівину й піроксенів. Саме ці зміни дають можливість оцінювати «ступінь зрілості» поверхні.

Також мікроудари викликають реголітоутворення — механічне подрібнення, спікання та рекристалізацію матеріалу. З часом поверхня зазнає циклічного перемішування гарденінгу (від англ. agardening), результатом чого є формування дрібнозернистого та спектрально зрілого шару [25, с. 72].

Таблиця 1.1

Основні фізичні механізми космічного вивітрювання та їх прояви

Механізм	Основні агенти	Ключові процеси	Прояви та наслідки
Сонячний вітер	Протони (H^+), He^{2+} , електрони	Іонне впровадження, опромінення електронним потоком, розпилення (sputtering)	Втрата летких елементів; утворення вакансій та дефектів; редукція $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^0$; потемніння та почервоніння спектру
Мікрометеоритне бомбардування	Частинки 0.01–1000 μm	Ударне плавлення, випаровування, конденсація; реголітоутворення	Формування аглютинатів; накопичення npFe^0 ; вертикальне перемішування поверхні
Галактичні космічні промені (ГКП)	Протони, важкі іони (MeV–GeV)	Ядерні реакції спалювання, аморфізація, трекове ушкодження	Створення дефектів ґратки; генерація космогенних ізотопів; повільна, але тривала модифікація структури матеріалу

Поняття космічного вивітрювання оформилось у науковому середовищі у другій половині XX століття внаслідок аналізу спектральних характеристик Місяця та малих тіл Сонячної системи. Перша фундаментальна суперечність — т. зв. «S-типова проблема» — виникла через невідповідність між спектрами S-типових астероїдів та спектрами звичайних хондритів (OC), які вважаються їх імовірними аналогами. S-об'єкти демонстрували:

- вищий спектральний ухил (reddening),

- сильніше приглушення діагностичних смуг поглинання,
- нижче альbedo в порівнянні з хондритами.

Це наштовхнуло на припущення, що поверхні астероїдів зазнають додаткового модифікаційного процесу, який спотворює спектральний підпис первинної породи [12, с. 1105].

Важливим кроком стало відкриття Binzel et al. (1996), які показали, що серед навколоземних астероїдів зустрічаються перехідні спектральні класи — від «свіжих», близьких до хондритних, до «зрілих», червонувато S-типових. Водночас місія Galileo вперше зафіксувала на Гаспра та Іді просторовий контраст: свіжі кратери виглядають «синіші», а старші — темніші та «червоніші». Це було прямим візуальним підтвердженням часової еволюції спектральних властивостей.

Початок глибокого розуміння фізики КВ пов'язаний із поверненням перших зразків місячного ґрунту програмами Apollo та Луна (1969–1976). Лабораторні дослідження цих зразків продемонстрували:

- домінування аглютинатів — скловмісних агрегатів, утворених унаслідок мікрометеоритних ударів;
- наявність нанофазного Fe^0 , інкапсульованого у шлаковидній матриці;
- утворення аморфних поверхневих плівок на олівіні та піроксені [25, с. 72].

Саме відкриття prFe^0 стало ключовим поясненням спектрального червоніння, зниження альbedo та ослаблення поглинальних смуг.

Подальші місії (зокрема, Hayabusa, OSIRIS-REx) підтвердили універсальний характер цих процесів. Частинки з Ітокави, повернуті місією Hayabusa, виявили тонкі патики та нанозалізисті частинки навіть на об'єкті розміром лише ~500 м. Це означає, що КВ ефективно працює навіть на дуже малих тілах із низькою гравітацією.

Таблиця 1.2

Ключові космічні місії у вивченні космічного вивітрювання

Місія (роки)	Ціль / об'єкт	Головні результати
Apollo / Luna (1969–1976)	Місяць	Виявлення аглютинатів, prFe^0 , структурних дефектів; запровадження поняття “ступінь зрілості” реголіту
Galileo (1991–1997)	Гаспра, Іда	Просторові контрасти між свіжими та зрілими поверхнями; підтвердження спектральної еволюції
NEAR Shoemaker (1996–2001)	Ерос	Встановлення гондритної природи поверхні, незважаючи на S-типовий спектр; підтвердження впливу КВ
Hayabusa (2003–2010)	Ітокава	Підтвердження наноплівок з Fe^0 ; аналіз мікроструктур патин; демонстрація ефективності КВ на малих тілах
OSIRIS-REx (2016–2023)	Бенну	Отримання зразків з вуглецевого астероїда; аналіз органічних фаз і їхньої стійкості до КВ
Лабораторні експерименти	Імітація КВ	Іонне опромінення (H^+ , He^{2+}), лазерне моделювання мікроударів; експериментальне отримання prFe^0 та спектральних змін

Процес космічного вивітрювання являє собою багатокomпонентну систему фізичних, хімічних та радіаційних механізмів, що взаємодіють у приповерхневих шарах реголіту безатмосферних тіл. Зміни, які виникають унаслідок цих процесів, охоплюють діапазон від атомного масштабу (наноплівки, точкові дефекти, атомна аморфізація) до мікрометричного (аглютинатні зерна, мікротреки ГКП).

Узагальнюючи сучасні дані спектроскопії, мікроструктурного аналізу та лабораторних моделювань, можна виділити три ключові компоненти, що формують сумарну дію космічного вивітрювання [44].

Сонячна радіація та плазмові потоки сонячного вітру охоплює інтенсивний вплив ультрафіолетового (УФ) випромінювання, потоків H^+ та He^{2+} , а також електронів сонячного походження. У верхньому шарі реголіту (перші десятки нанометрів) реалізуються такі процеси, які представлено у Таблиці 1.3.:

Таблиця 1.3.

Радіаційно-плазмові механізми КВ

Процес	Масштаб впливу	Наслідки
Фотоопромінення	1–10 нм	Десорбція летких компонентів
Іонне впровадження	10–50 нм	Утворення глибоких дефектів, відновлення Fe^{2+}
Електронне опромінення	5–30 нм	Локальна аморфізація, зарядове модифікування
УФ-вплив	1–5 нм	Поверхнева хімічна активізація

Постійне зіткнення реголіту з мікрометеороїдами розміром $\sim 10^{-4}$ – 10^{-3} м зі швидкостями 5–20 км/с формує найбільш енергійний компонент КВ. Вплив мікроударів реалізується через:

- миттєве ударне плавлення поверхневого шару (температури можуть перевищувати 2000–2500 К);
- ударне випаровування і подальшу конденсацію пари, що створює ультратонкі патини;
- формування аглютинатів — скловмісних мікрогранул з включеннями обпаленої породи, уламків мінералів та npFe^0 ;
- розпилення (sputtering) атомів з поверхні, що сприяє втратах летких компонентів і поступовому зменшенню маси поверхневих шарів;
- механічне перемішування реголіту (gardening), що викликає циклічне відкриття «свіжих» зерен для подальшого опромінення [4, с. 616].

Особливо важливим є той факт, що в процесі ударного плавлення формуються стабільні структури шлаковидного скла, у яких відбувається концентрація нанофазного Fe^0 . Це робить мікрометеоритне бомбардування основним чинником довготривалого потемніння реголіту [23].

Галактичні космічні промені, що складаються з протонів та важких іонів з енергіями від MeV до GeV, хоча й створюють менш виражений оптичний ефект порівняно з сонячним вітром і мікроударними процесами, відіграють істотну роль у глибинній радіаційній модифікації мінералів.

Основні механізми дії ГКП:

- створення треків від проходження важких іонів (ion tracks) у кристалічній ґратці;
- ядерні реакції спалювання та розщеплення (spallation), що приводять до утворення космогенних ізотопів;
- мікроаморфізація у зоні треку та порушення орбітаційної структури атомів;
- зміна ізотопного складу поверхневих шарів на глибину до кількох десятків сантиметрів.

Ці процеси важливі насамперед як хронометри, що дають змогу оцінювати час перебування поверхні у космічному середовищі, а також як індикатори динаміки реголіту [37].

Хоча кожен із перелічених механізмів має власні часові масштаби, енергетичні характеристики та просторовий вплив, реальні поверхні зазнають їхньої комбінованої дії, що створює ефекти, недосяжні для окремих процесів.

Ключові синергетичні взаємодії:

- Постударні розплави є сприятливими середовищами для збагачення Fe^0 , оскільки швидке охолодження фіксує наночастинки, утворені під дією сонячного вітру.
- Реголітарний гарденінг періодично відкриває нові мінеральні фрагменти, що збільшує ефективність опромінення та іонного впровадження.
- Розпилення, спричинене як мікроударами, так і іонами сонячного вітру, прискорює хімічні модифікації поверхні.
- Утворення патиноутворювальних плівок відбувається швидше в комбінації з УФ-випромінюванням, яке активує поверхневі реакції [27].

Отже, процеси космічного вивітрювання становлять комплекс взаємопов'язаних фізичних, хімічних і радіаційних механізмів, які визначають еволюцію оптичних, мінералогічних та структурних властивостей поверхні безатмосферних тіл. Сукупний вплив сонячного вітру, мікрометеоритних ударів і галактичних космічних променів формує характерні ознаки "зрілої" поверхні — від

утворення патин та нанофазного Fe^0 до розвитку аглютинатів і радіаційних дефектів. Саме поєднання цих компонентів, посилене реголітарним гарденінгом, забезпечує динамічну і довготривалу модифікацію поверхневого шару.

1.2. Вплив сонячної радіації та плазми: механізми іонної імплантації

Сонячний вітер являє собою квазінейтральний потік плазми, що постійно витікає з верхніх шарів сонячної корони. Його склад та енергетичні параметри визначають масштаби та інтенсивність взаємодії із поверхнями безатмосферних тіл [19].

Основні характеристики сонячного вітру (Рис. 1.2.):

Склад:

- протони (H^+) — $\approx 95\%$,
- α -частинки (He^{2+}) — $\approx 3\text{--}5\%$,
- електрони — залишкова частина,
- важкі йони (O^{6+} , C^{5+} , Fe^{9+} тощо) — $\leq 0.1\%$.

Типові швидкості:

- $\sim 400\text{--}800$ км/с (відповідні енергії $\approx 1\text{--}10$ кеВ).

Температура електронів:

- $10^4\text{--}10^6$ К.

Щільність плазми поблизу 1 а.о.:

- $3\text{--}10$ частинок/см³.

Рисунок 1.2. Основні характеристики сонячного вітру

Плазмовий потік сонячного вітру безперешкодно досягає поверхонь безатмосферних тіл і взаємодіє з їхнім реголітом на нанометрових глибинах, поступово змінюючи його структурні, хімічні та оптичні властивості. Масштаби цієї взаємодії на Місяці значною мірою визначаються його положенням у системі Земля—Сонце. Коли Місяць занурюється в магнітний хвіст Землі, інтенсивність сонячного вітру різко падає: густина іонів у цьому регіоні зменшується на 2–3 порядки, що

тимчасово послаблює дію сонячно-плазмових процесів на місячну поверхню. Однак межі магнітного хвоста характеризуються складною просторовою структурою, у якій локальні плазмові градієнти спричиняють нерівномірний розподіл енергетичних частинок. Через це інтенсивність іонної імплантації може істотно варіювати навіть у межах сусідніх ділянок поверхні. Після виходу Місяця з магнітного хвоста настає повернення до нормального режиму взаємодії з сонячним вітром, що супроводжується відновленням характерного рівня енергетичного навантаження на реголіт [14].

Постійний потік протонів та важчих іонів, які проникають у верхні 10–100 нм поверхневого шару, запускає низку мікрофізичних процесів. Одним із них є іонне впровадження, коли частинки сонячного вітру вбудовуються у кристалічну ґратку мінералів або в аморфізований шар, спричиняючи локальні зміни хімічного складу. Паралельно діють радіаційно-індуковані механізми: міжатомні зіткнення у твердому тілі генерують дефекти, порушення координації та аморфізацію, що впливає на стабільність мінеральних фаз. Іонна дія також сприяє перерозподілу елементів у приповерхневій зоні — легкі компоненти можуть мігрувати або залишати поверхню, тоді як важчі елементи накопичуються. Усе це створює передумови для формування нанофазного металевого заліза (npFe^0), яке є одним із ключових продуктів космічного вивітрювання і значною мірою визначає оптичні властивості зрілого реголіту [44].

Таблиця 1.4

Основні параметри сонячного вітру поблизу безатмосферних тіл

Параметр	Значення	Коментар
Швидкість потоку	300–800 км/с	Залежить від фаз сонячного циклу
Енергія протонів	1–10 кеВ	Типові значення для "повільного" сонячного вітру
Щільність плазми	3–10 см ⁻³	Варіює у 2–3 рази впродовж доби
Частка He^{2+}	3–5 %	Має більший імпульсний внесок у руйнування ґратки
Іонні потоки в магнітному хвості	$\leq 10^{-2}$ від нормальних	Екранування земної магнітосфери

Розпорошення (sputtering) є одним із базових мікрофізичних механізмів космічного вивітрювання, що визначає поступову втрату матеріалу з поверхні безатмосферних тіл. На відміну від термічних процесів, воно зумовлене безпосередньою передачею імпульсу високошвидкісними іонами сонячного вітру атомам кристалічної ґратки. Коли протон або важчий іон із енергіями у діапазоні десятків–сотень кеВ досягає поверхні, відбувається передача частини кінетичної енергії атомам мінеральної матриці, що запускає каскад зіткнень. Унаслідок цього вторинні атоми отримують достатню енергію для подолання потенційного бар'єра поверхні та вильоту у міжпланетний простір. Такий процес супроводжується появою некогерентних точкових дефектів, деформацією ґратки та локальними змінами хімічного складу приповерхневого шару [50].

Ефективність розпорошення визначається комплексом параметрів, серед яких енергія первинного іона, його атомна маса та кут падіння. Найвищі значення коефіцієнта (sputter yield) характерні для кутів, близьких до 60° , за яких передача імпульсу є максимально ефективною. Не менш важливими є мінералогічні властивості поверхні: мінерали зі слабшими міжатомними зв'язками або з аморфізованим приповерхневим шаром демонструють підвищену вибивну здатність. Унаслідок цього легкі та легко іонізовані елементи (передусім Na, K, S) втрачаються швидше, тоді як Mg і Si зазвичай мають помірний вихід, а Fe і Ti — мінімальний. Тривала дія цього процесу поступово змінює стехіометрію реголіту: відбувається вилуговування легких компонентів, поверхня втрачає легкі елементи, а відносна частка важких металів, зокрема заліза, збільшується [19].

Оскільки атмосфера відсутня, вибиті атоми не затримуються над поверхнею: більшість із них безповоротно залишає тіло, а незначна частина може повторно осідати на сусідніх ділянках. Кумулятивний ефект розпорошення проявляється не лише у хімічному збідненні реголіту, а й у зміні його спектральних характеристик — зокрема, приглушенні діагностичних смуг поглинання та загальному «скривленні» спектра, що є типовими ознаками зрілого космічно вивітреного матеріалу [20, с. 228].

Таблиця 1.5

Основні наслідки процесу розпорошення

Наслідок	Масштаб	Фізичний ефект
Втрата летких елементів	10–100 нм	Зміна хімічного складу
Модифікація стехіометрії	10–50 нм	Відносне збагачення Fe, Ti
Поглиблення оптичного потемніння	Спектральний діапазон 0.4–2.5 мкм	Приглушення поглинальних смуг
Вторинне утворення нанодефектів	<30 нм	Активізація подальшої імплантації
Втрата поверхневої маси	Макроскопічний масштаб за геологічні інтервали	Тривале зменшення маси реголіту

Іонна імплантація є одним із ключових механізмів модифікації приповерхневого шару реголіту під дією сонячного вітру. Хоча проникнення протонів і α -частинок обмежується нанометровими масштабами, цього достатньо для формування дефектів ґратки: вакансій, міжвузлових перенесень, локальних зон розупорядкування. Фіксуються й радіаційні треки, що відображають проходження енергійних іонів крізь кристалічну структуру [8]. У результаті найбільш навантажені ділянки зазнають часткової аморфізації, а мінеральний матеріал локально набуває властивостей ударного скла. Імпантовані H^+ та He^{2+} накопичуються в мікропорожнинах, утворюючи газові включення, які впливають на пористість і механічні параметри реголіту. Водень при цьому відіграє відновну роль у хімічних перетвореннях приповерхневих мінералів [15].

Найважливішим наслідком іонного впровадження є відновлення заліза й утворення нанофазного металевого Fe^0 (npFe⁰). Під дією протонів Fe^{2+} переходить у нульвалентний стан з формуванням наночастинок, що концентруються на поверхнях зерен і у складивидній матриці аглютинатів. Наявність npFe⁰ стала вирішальним доказом мікрофізичного походження спектральної модифікації поверхонь безатмосферних тіл: металеві наночастинки ефективно поглинають світло, спричиняючи потемніння спектра, його почервоніння та зменшення глибини діагностичних смуг [50].

Накопичення нанофазного заліза встановлює кількісний зв'язок між тривалістю дії сонячного вітру та оптичною «зрілістю» поверхні.

Узагальнюючи, взаємодія сонячного вітру з реголітом охоплює іонне впровадження, радіаційні дефекти та розпорошення, що спричиняють аморфізацію, зміну стехіометрії й перерозподіл елементів. Сукупна дія цих процесів формує ранні стадії патини космічного вивітрювання і визначає спектральні особливості, важливі для інтерпретації дистанційних спостережень [31].

1.3. Вплив мікрометеоритного бомбардування та ударні процеси

Мікрометеоритне бомбардування становить один із базових механізмів космічного вивітрювання, оскільки воно одночасно забезпечує механічне руйнування, ударно-термічні перетворення та хімічно-фізичну модифікацію поверхневого шару реголіту. Завдяки високим швидкостям і великій частоті зіткнень навіть мікроскопічні фрагменти космічного матеріалу чинять суттєвий вплив на структурну й оптичну еволюцію безатмосферних поверхонь.

Мікрометеорити, діаметри яких охоплюють діапазон від кількох мікрометрів до міліметра, формують практично безперервний потік, що бомбардує поверхні Місяця, Меркурія та астероїдів. Незважаючи на малу масу окремих частинок, їхня кінетична енергія є надзвичайно великою завдяки швидкостям фактичного входження, які у внутрішній Сонячній системі досягають 5–20 км/с. Умовно навіть тіло розміром у частку міліметра за таких швидкостей створює удар з енергією, достатньою для локального плавлення, генерації мікрократерів і переміщення мінеральної речовини на масштабах, що перевищують власний розмір у десятки разів [8].

Висока енергія мікроударів визначає (Рис. 1.3):

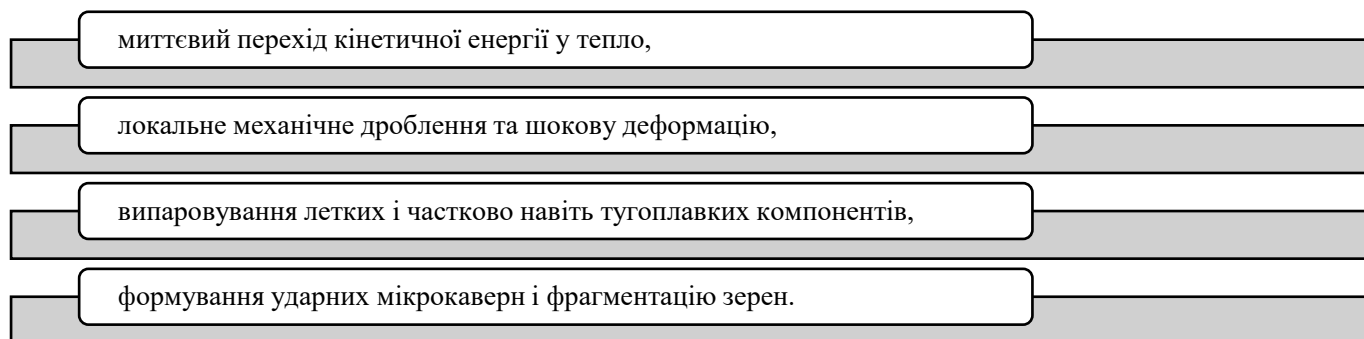


Рисунок 1.3. Вплив високої енергії мікроударів

Таким чином, енергетичний внесок мікрометеоритів є не лише руйнівним, але й структуроформувальним.

Ударні процеси супроводжуються утворенням локальних зон повного або часткового розплаву. Так званий *impact melt* формується внаслідок комбінації ударного стиску, миттєвого нагрівання та подальшої релаксації тиску. Розплавлений матеріал швидко загартовується, утворюючи:

- аглютинатне скло, що містить включення мінеральних уламків, дрібних фрагментів реголіту та нанофазного Fe⁰;
- скловидні покрити (patina layers), які виникають унаслідок конденсації ударної пари на прилеглих зернах;
- тонкі поверхневі оплавлення, що діють як «архів» мікроударних подій [5].

Випаровування є критично важливим для втрати летких елементів та формування наночастинок металевого заліза. Хмара ударної пари, що розширюється, містить велику кількість атомів Fe, Mg, Si та летких компонентів. Під час охолодження частина цієї пари конденсується у вигляді ультратонких скляних нашарувань, збагачених нанофазним залізом. Саме ці частинки є інтенсивними поглиначами світла і визначають оптичні характеристики «зрілого» реголіту.

Реголіт не є статичною системою: мікрометеоритні удари постійно перемішують його верхні шари, приводячи до циклічного оновлення поверхні Цей

процес відомий як реголітарний гарденінг (*regolith gardening*). Його ключові риси (Рис. 1.4.) [35]:

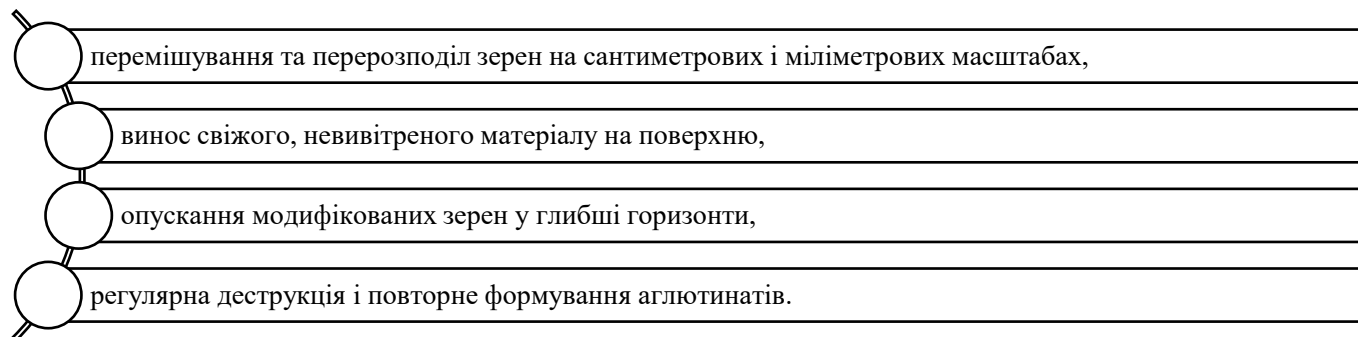


Рисунок 1.4. Ключові риси реголіту

У сталій рівновазі швидкість вивітрювання обмежена саме швидкістю гарденінгу: поверхневі зміни можуть нагромаджуватися лише до того моменту, доки удар не перемістить зерно на глибину, де дія сонячного вітру менш інтенсивна. На малих астероїдах, де тяжіння слабке, а мікроудари спричиняють значне переміщення частинок, поверхня може оновлюватися настільки швидко, що оптична «зрілість» досягається лише частково.

Особливу роль відіграє синергетична дія мікроударів та сонячного вітру. Мікрометеоритні події створюють:

- свіжі поверхні і складові покриви, які є особливо чутливими до іонної імплантації;
- ударно аморфізований матеріал, у якому полегшується дифузія водню;
- локальні високотемпературні області, де прискорюються процеси відновлення $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^0$ [40].

Після удару сонячний вітер діє на «омолоджену» поверхню: впроваджені протони, електрони та іони гелію взаємодіють із ударним склом і мінеральними фрагментами, інтенсифікуючи утворення нанофазного металевого заліза. Таким чином, саме на ділянках з високою щільністю мікрократерів спостерігається прискорене потемніння і збільшення спектральної червонуватості [15].

Узагальнюючи, мікрометеоритне бомбардування виступає не лише агентом механічного руйнування, але й ключовим фактором термічної, хімічної та структурної еволюції реголіту. Саме завдяки комбінованій дії ударних процесів та сонячного вітру формується характерний вигляд зрілої поверхні безатмосферних тіл — темний, «червоний» спектрально, зі значним рівнем аморфізації та високим вмістом нанофазного заліза.

1.4. Хімічні та спектральні наслідки вивітрювання

Космічне вивітрювання охоплює комплекс фізичних і хімічних процесів, що діють у поверхневих шарах безатмосферних тіл під впливом сонячного вітру, ультрафіолетового випромінювання та мікрометеоритів. Тривала дія цих чинників спричиняє формування аморфізованих прошарків, зміну морфології зерен і порушення кристалічної будови, а також накопичення нанофазних продуктів редукції, передусім металевого Fe^0 (np Fe^0). Такі перетворення зумовлюють перерозподіл елементів у верхньому мікрометрі поверхні та впливають на спектральні характеристики, ускладнюючи інтерпретацію дистанційних спостережень [5].

Хімічна еволюція поверхневого матеріалу включає втрату летких компонентів, фракціонування елементів і надходження екзогенного матеріалу. Однією з найпомітніших ранніх ознак є збіднення поверхні на натрій, калій, сірку, цинк та інші леткі елементи. Ударне плавлення й локальні температурні піки, разом із дією заряджених частинок, сприяють десорбції цих компонентів; частина їх реконденсується тонкими плівками, частина втрачається в міжпланетний простір, а незначна частка бере участь у формуванні розріджених екзосфер, як на Місяці [24, с. 93].

Водночас відбувається перерозподіл структуроутворювальних елементів. Вибивання силікатних фрагментів і продукти ударного плавлення змінюють співвідношення Fe/Si та Mg/Si у поверхневому склі, зумовлюючи його

«металізований» характер. Зменшується внесок алюмінієвих і кальцієвих силікатів, які швидше зазнають аморфізації, а поверхневий шар збагачується продуктами неповного відновлення [12, с. 1105].

Важливу роль відіграє і надходження екзогенного матеріалу. Сонячний вітер імпантує в реголіт водень і гелій на глибини до десятків нанометрів. Мікрометеоритні зіткнення сприяють утворенню карбідів, силіцидів і дрібних крапель металевого Fe, а міжпланетний пил приносить ізотопні компоненти, відмінні від ендегенного складу. Таким чином, поверхневий шар набуває багатофазної структури, у якій первинні мінерали поєднані з вторинними продуктами різного походження.

Основні хімічні тенденції поверхневих змін, зумовлених космічним вивітрюванням, наведено в таблиці 1.8 [22].

Таблиця 1.6

Основні хімічні наслідки космічного вивітрювання поверхні реголіту

Процес	Характеристика	Основні наслідки
Втрата летких елементів	Десорбція та сублімація Na, K, S, Zn тощо під дією сонячного вітру та мікроударів	Збіднення поверхневого шару на леткі компоненти; формування наноплівок із реконденсату
Фракціонування важких і легких елементів	Вибіркове вибивання силікатів, аморфізація поверхневого скла	Підвищення Fe/Si та Mg/Si; зменшення частки Al- та Ca-силікатів; зростання «металізованої» складової
Імплантація екзогенного матеріалу	Надходження H, He із сонячного вітру; внесення мікрометеоритних сполук і міжпланетного пилу	Акумуляція імпантованих газів; утворення карбідів, силіцидів, наночастинок Fe; поява ізотопних аномалій

Спектральні трансформації є найбільш характерною ознакою КВ. Вони поєднують структурні зміни в зернах та оптичні властивості нанофазних домішок і можуть бути описані трьома ключовими проявами (Рис.1.5) [40]:

1) Почервоніння спектрального ухилу (Reddening)

- збільшення відносної відбивної здатності на довгих хвилях;
- крутіший нахил спектральної кривої у видимому та ближньому ІЧ;
- обумовлено плазмонними властивостями npFe^0 , яке ефективно поглинає короткохвильове випромінювання.

2) Потемніння (Darkening)

- зниження альbedo на всіх довжинах хвиль;
- значний внесок скляної фракції аглютинатів та нанозерен Fe^0 ;
- за даними спектrophотометрії, зрілі ділянки місячного реголіту на 10–30 % темніші за молоді.

3) Ослаблення смуг поглинання силікатів (Band Attenuation)

- зменшення глибини смуг біля 1 та 2 μm , характерних для піроксенів та олівіну;
- інколи майже повне «згасання» силікатних мінімумів;
- виникає через покриття поверхні наночастинок npFe^0 та множинні розсіювально-абсорбційні ефекти у складній матриці.

Рисунок 1.5. Спектральні прояви космічного вивітрювання

Наведені ефекти формують спектральний «портрет» зрілої поверхні, що дозволяє здійснювати порівняння між різними регіонами планетних тіл.

Наночастинок залізо (npFe^0) відіграє центральну роль у формуванні спектрального вигляду поверхні повітрянонезахищених тіл і вважається одним із найчутливіших індикаторів ступеня зрілості реголіту. Воно утворюється в умовах, коли верхні шари зерен зазнають надвисоких температур під час мікрометеоритного плавлення, або ж проходять крізь етапи локальної редукції заліза під дією інтенсивного потоку сонячного вітру. В окремих випадках npFe^0 формується й під час надкоротких термічних імпульсів, пов'язаних із дегазацією і перегрівом поверхневого скла. Усі ці процеси відбуваються на масштабах десятків нанометрів, проте їхній сумарний вплив має макроскопічні спектральні наслідки [33].

Оптичні властивості наночастинок заліза визначаються його здатністю ефективно поглинати короткохвильову частину спектра й формувати виразний плазмонний відгук електронного газу. Навіть надзвичайно малі масові концентрації — на рівні сотих часток відсотка — істотно змінюють оптичні константи

поверхневого шару, порушуючи первинний баланс між відбиванням і поглинанням. Саме тому prFe^0 може кардинально модифікувати спектральні характеристики без помітного впливу на мінеральний склад, що робить його одним із найефективніших «невидимих» агентів спектрального потемніння [24, с. 93].

Лабораторні моделі й експериментальні імітації підтверджують високу чутливість спектра до навіть мінімальної кількості нанофазного заліза. Зокрема, встановлено, що при його вмісті близько 0.05 % спектральний ухил у видимому діапазоні може зростати на 15–20 %, тоді як глибина характерних поглинальних смуг піроксену зменшується майже вдвічі. Паралельно з цим накопичення prFe^0 у складі аглютинатів супроводжується збільшенням мікропористості та складнішою поведінкою розсіювання, що призводить до характерного «згладження» спектра [6].

Нанофазне залізо функціонує як високоефективний оптичний модифікатор поверхні. Його присутність відображається не лише у зміні ухилу чи глибини спектральних смуг, а й у загальній тенденції до затемнення та спектрального «старіння» реголіту. Саме тому кількісні оцінки вмісту prFe^0 розглядають як один із основних параметрів, що дозволяє визначати ступінь зрілості поверхневого шару на Місяці та інших тіл Сонячної системи.

Для системної оцінки рівня КВ розроблено набір спектральних індексів, що дозволяють стандартизувати вимірювання для різних місій і планетних тіл [33].

Основні індекси представлені у Рисунку 1.6 [48]:

SMI (Spectral Maturity Index)

- Оцінює співвідношення рефлектансів у вибраних діапазонах з урахуванням рівня почервоніння та ослаблення смуг.

OMAT (Optical Maturity)

- Визначає відносну «оптичну зрілість» поверхні за співвідношенням відбивання на 750 та 950 нм.
- Зменшення OMAT вказує на підвищену концентрацію npFe^0 .

Індекси піроксен-олівінових поглинань

- Використовуються для корекції впливу вивітрювання при порівнянні спектрів астероїдів та метеоритів.

Рисунок 1.6. Кількісні індекси вивітрювання

Отже, нанофазне залізо постає визначальним чинником спектральної еволюції зрілого реголіту. Його поява під дією мікрометеоритного плавлення та сонячного вітру зумовлює системні зміни в оптичній поведінці поверхневих матеріалів — від підсилення спектрального ухилу до згасання характерних мінеральних поглинань. Навіть мінімальні концентрації npFe^0 істотно модифікують оптичні константи, що робить цей компонент надійним індикатором ступеня вивітрювання місячного ґрунту.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИВІТРЮВАННЯ

2.1. Лабораторне моделювання космічного вивітрювання

Лабораторні моделі космічного вивітрювання створюють у високовакуумних середовищах (UHV-умовах), де тиск знижують до рівнів 10^{-6} – 10^{-9} мбар. Такі режими мінімізують сторонні хімічні реакції та забезпечують умови, максимально наближені до поверхонь Місяця, астероїдів та інших безатмосферних тіл. Подібні установки дозволяють ізолювати окремі підсистеми процесу вивітрювання, серед яких:

- вплив сонячного вітру (іонне бомбардування);
- мікрометеоритне плавлення;
- фотохімічні реакції, спричинені ультрафіолетом;
- комбіновані ефекти, що поєднують нагрівання, розпилення та структурну перебудову.

У межах експерименту зразки мінералів або аналогів реголіту фіксують на кріо- або термостійких тримачах, контролюючи температуру в діапазоні від кріогенних значень до 400–500 °C (для моделювання денних піків на Місяці та окремих класах NEA-астероїдів). Системи *in situ*-спостереження забезпечують неперервний моніторинг спектральних, морфологічних і хімічних змін без контакту з атмосферою Землі [21].

Попри високий ступінь контрольованості, жодна лабораторна схема не може повністю відтворити сукупний ефект мільярдолітнього космічного вивітрювання, тому застосовують модульні підходи, де кожний фактор моделюється окремо, а результати інтегрують аналітично.

Моделювання космічного вивітрювання у вакуумних камерах ґрунтується на використанні комплексних експериментальних систем, здатних відтворювати ключові чинники, що діють на поверхні безатмосферних тіл. Такі установки

поєднують одразу кілька типів джерел випромінювання та діагностичного обладнання, розміщеного у середовищі з наднизьким тиском. Центральним елементом експериментальної схеми виступають джерела іонів, які генерують потоки протонів та гелієвих ядер у широкому діапазоні енергій та дозволяють точно відтворювати параметри сонячного вітру. Поряд із ними застосовують імпульсні лазери — найчастіше Nd:YAG — що створюють ультракороткі енергетичні імпульси імітації мікрометеоритних ударів, а також УФ-генератори, які забезпечують керовані фотонні потоки, релевантні для відтворення фотохімічних ефектів [48].

Усі ці джерела працюють у рамках суворо регламентованих експериментальних умов. Вакуум у камері підтримується на рівні 10^{-6} – 10^{-9} мбар, що дає можливість мінімізувати взаємодію поверхні з атмосферними газами та уникнути вторинного окиснення. Температурні режими варіюють у широкому діапазоні — від криогенних значень, характерних для постійно затінених ділянок Місяця (близько -170 °C), до високотемпературних умов, які можуть реалізовуватися на поверхні малих тіл при прямому сонячному опроміненні (до $+450$ °C). До контрольованих параметрів належать не лише температура чи тиск, але й енергія та дозування іонного потоку, потужність лазерних імпульсів, інтенсивність УФ-випромінювання та тривалість експозиції, що дозволяє з високою точністю моделювати тривалу дію різних космічних факторів [43].

Ключовим елементом такого підходу є можливість виконання вимірювань у режимі *in situ*, без вилучення зразка із вакуумного середовища. Для цього у камеру інтегрують широкий спектр діагностичних інструментів: спектрометри відбивання в діапазоні 0.4 – 2.5 мкм, системи Raman- та FTIR-аналізу для виявлення структурних змін, XPS-спектроскопію для оцінювання хімічних станів елементів, а також SEM/TEM-мікроскопію, що дозволяє простежити зародження та ріст наночастинок у поверхневому склі. Сукупність таких методів забезпечує можливість спостерігати еволюцію зразка «в режимі реального часу», фіксуючи мінімальні зміни морфології, структури та спектральної відповіді [21].

У цілому вакуумні лабораторні системи дозволяють створити відтворені, керовані та параметризовані умови для дослідження окремих складових космічного вивітрювання. Хоча такі моделі не здатні повністю охопити складність природного середовища, вони відкривають можливість для детального аналізу взаємодії іонів, фотонів та ударних імпульсів з мінеральними поверхнями та забезпечують фундаментальний матеріал для інтерпретації спектральних властивостей реальних поверхонь планетарних тіл [7].

Таблиця 2.1.

Основні методи лабораторного моделювання космічного вивітрювання

Метод	Який процес імітує	Ключові параметри	Переваги	Обмеження
Іонне опромінення (H^+ , He^{2+})	Сонячний вітер	Енергія 0.5–10 кеВ, дози $\sim 10^{17}$ – 10^{18} іонів/см ²	Реалістична редукція $Fe^{2+} \rightarrow Fe^0$, контрольована інтенсивність	Не імітує ударні та теплові ефекти
Імпульсне лазерне опромінення	Мікрометеоритні удари	Імпульс нс-масштабу, 10–100 мДж/мм ²	Генерує розплави, аглютинати, $npFe^0$	Відсутність хвильового фронту шокової хвилі
УФ-опромінення	Сонячна радіація	Широкий спектр	Моделює фотохімію органіки	Слабкий структурний вплив на мінерали
Комбіновані експерименти	Комплексні ефекти	Послідовне/одночасне застосування факторів	Дослідження синергетики	Складна інтерпретація

Іонне опромінення є одним із найбільш розроблених і точних способів моделювання впливу сонячного вітру. Для цього застосовують іонні прискорювачі, що генерують контрольовані потоки:

- протонів (H^+) — основна складова сонячного вітру;
- альфа-частинок (He^{2+}) — другорядний, але важливий елемент потоку;
- інколи важчих іонів (O^+ , Fe^+), що моделюють високоенергетичні компоненти.

Ключові параметри іонного опромінення представлено у Рисунку 2.1. [52].

Енергія:	500 eV – 10 keV
Доза:	10^{15} – 10^{18} іонів/см ²
Параметри експозиції:	від кількох хвилин до десятків годин
Методи аналізу:	спектроскопія відбивання, XPS, ТЕМ-аналіз утворених наночастинок

Рисунок 2.1. Ключові параметри іонного опромінення

Іонне бомбардування поступово руйнує верхні нанометрові шари кристалічної решітки, спричиняє *розупорядкування структури*, вивільнення Fe^{2+} з силікатів та його редукцію до металевого Fe^0 . Так формується нанофазне залізо (npFe^0) — ключовий компонент спектрального потемніння та почервоніння.

Основні експериментально зафіксовані ефекти:

- зростання спектрального ухилу (reddening);
- зниження загального альбедо (darkening);
- ослаблення смуг поглинання олівіну та піроксену;
- підсилення безперервної компоненти розсіювання [43].

Таблиця 2.2

Ефекти іонного опромінення на властивості силікатів

Показник	Початковий стан	Після іонного опромінення	Інтерпретація
Спектральний схил	Нейтральний або слабкий	Стабільне збільшення	Утворення npFe^0 у поверхневих шарах
Альбедо	0.25–0.35 для більшості силікатів	Падіння на 5–20 %	Підсилене поглинання нанофазного заліза
Глибина смуг поглинання	Виражені 1 і 2 μm	Ослаблення до 30–60 %	Розупорядкування структури та металізація поверхні
Поверхнева морфологія	Впорядкована, згладжена	Порушена, з аморфними прошарками	Результат іонного розпорошення та відновних реакцій

Як наслідок, техніки іонного опромінення забезпечують точне відтворення ключових етапів космічного вивітрювання та виступають базовим інструментом для реконструкції еволюції спектральних властивостей поверхонь безатмосферних тіл [7].

У межах моделювання процесів космічного вивітрювання окреме місце посідає відтворення мікрометеоритного бомбардування. Одним із поширених підходів є імпульсна лазерна іррадіація (Pulsed Laser Irradiation, PLI), що дає змогу відтворити короточасні теплові піки, характерні для зіткнень частинок, які рухаються зі швидкістю десятків кілометрів за секунду. Наносекундні імпульси високої енергії локально розплавляють поверхневий шар мінералу або порошкової фракції, спричиняючи випаровування, перерозподіл речовини та формування склоподібних застиглих плівок. У таких плівках часто фіксують наночастинки металевого заліза, інкапсульовані в аморфній матриці, що за морфологією та оптичними властивостями нагадують аглютинати з природного місячного реголіту. Зафіксовані спектральні зміни – зокрема зниження загального альбедо й характерне посилення червоного нахилу відбиття – узгоджуються з тими, що спостерігаються під час реального мікрометеоритного опромінення. Водночас PLI не відтворює повного комплексу ударних процесів: відсутні хвильові деформації, механічне подрібнення та ударне спікання. Внаслідок цього метод доцільно розглядати передусім як інструмент моделювання термічної складової мікрометеоритних подій, а не їхньої механічної динаміки [38].

Після завершення лабораторних експериментів з іонного чи лазерного опромінення настає етап детального аналітичного дослідження змінених поверхонь. Зразки аналізують комплексом методів, що дозволяє охопити широкий діапазон структурних, хімічних та морфологічних змін на нанорівні. Просвічуюча електронна мікроскопія (ТЕМ) забезпечує пряме спостереження нанофазного заліза, яке формується у вигляді сферичних або частково деформованих частинок, занурених у аморфні та нанокристалічні плівки. Аналіз ТЕМ надає дані про розподіл та розміри npFe , товщину модифікованого шару та мікроморфологію ударних утворень. Методи

поверхневої спектроскопії – XPS та Auger-аналіз – дають змогу визначити хімічний склад верхніх нанометрів, простежити ступінь відновлення заліза, виявити імплантацію легких елементів, характерних для сонячного вітру (H, He), а також оцінити зміни в оксидних і сульфідних плівках. Сканувальна електронна мікроскопія з польовою емісією (FESEM) доповнює цей аналіз високою роздільністю морфологічних зображень, дозволяючи відстежувати розвиток мікрократерів, вимерців, характерних обвуглених поверхонь та структур аглютинатів [49].

У разі потреби до аналізу залучають методи, чутливі до валентного стану заліза, зокрема мессбауерівську спектроскопію, що дозволяє фіксувати співвідношення $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^0$ та виявляти нанофазне залізо за особливостями гамма-поглинання. Ізотопні методи, зокрема SIMS та IRMS, застосовують для визначення концентрацій та ізотопного складу елементів сонячного вітру, які потрапляють до поверхневих шарів мінералів під час експозиції. Ці дані дають змогу оцінити тривалість перебування матеріалу на відкритій поверхні та реконструювати історію космічного вивітрювання окремих зерен.

Таким чином, комбінація експериментального моделювання та мультиспектрального аналізу формує комплексний інструментарій для дослідження фізичних і хімічних процесів, що визначають еволюцію поверхні безатмосферних тіл Сонячної системи [14].

Отже, вакуумні експериментальні системи створюють кероване середовище, у якому можна цілеспрямовано відтворювати окремі режими космічного вивітрювання та простежувати їхній вплив на властивості мінеральних поверхонь. Поєднання іонних джерел, лазерних імпульсів, фотонного опромінення й високоточної діагностики забезпечує якісно новий рівень контролю над параметрами експерименту та дозволяє оцінювати спектральні, структурні й хімічні зміни в зразках у реальному часі. Такі підходи формують необхідну лабораторну основу для інтерпретації процесів, що визначають еволюцію поверхонь безатмосферних тіл.

2.2. Дослідження зразків, доставлених з поверхні космічних тіл

Повернені місячні зразки стали основою сучасного розуміння механізмів космічного вивітрювання. Аналіз фракцій реголіту, отриманих місією Apollo, засвідчив, що найдрібніші частинки (< 25 мкм) зазнають найбільш інтенсивної поверхневої модифікації. Для них характерні товсті аморфні плівки, збагачені нанофазним залізом, що істотно впливають на інтегральні спектральні параметри ґрунту. Такі зерна формують усереднений спектральний сигнал ділянки поверхні завдяки значній питомій площі поверхні та підвищеному вмісту металевих наночастинок.

Однією з найпоказовіших структур місячного реголіту є аглютинати — склоподібні частинки, утворені внаслідок мікрометеоритних ударів. У їхньому складі виявлено наночастинки Fe^0 діаметром від кількох до сотень нанометрів, що виникають під час короткочасного локального плавлення та відновлення FeO . У поверхневих шарах зерен спостерігаються так звані вітрові плівки (patina), які містять ультрадрібні наночастинки металевого заліза, імплантовані іони гелію та водню, а також продукти дегазації [11].

Значення цих структур для оптичної характеристики реголіту підтверджує концепція «оптичної зрілості» (optical maturity). Показник ОМАТ, запропонований на основі даних місії *Clementine*, дозволяє відокремити ефекти вивітрювання від мінерального складу. Його зменшення корелює зі зниженням альbedo, посиленням спектрального нахилу в червону ділянку та загальним «потемнінням» ґрунту. Порівняння спектрів реголіту до та після виділення аглютинатів демонструє, що саме нанофазне залізо, а не зміни силікатної матриці, є ключовим чинником спектральних модифікацій [47].

Астероїдні матеріали, доставлені місіями *Hayabusa*, *Hayabusa2* та *OSIRIS-REx*, розширили уявлення про космічне вивітрювання за межами Місяця. Зокрема, зразки астероїда Ітокава (S-тип) засвідчили наявність тонких ($\sim 5\text{--}15$ нм) модифікованих

поверхневих оболонок, які містять сульфуровані форми нанофазного заліза та дрібні металеві включення в силікатних мінералах. Ці структури підтверджують домінування сонячного вітру як чинника вивітрювання для безводних S-астероїдів [39].

На астероїдах С-типу, таких як *Ryugu* та *Bennu*, процеси мають іншу природу. Зразки *Ryugu* свідчать про співіснування гідратованих мінералів, аглютинатоподібних склоподібних фаз та npFe . Вода, присутня в матриці вуглецевих хондритів, змінює характер і ступінь спектрального вивітрювання: зокрема, слабшають традиційні ділянки поглинання у видимому діапазоні, тоді як інфрачервоні характеристики можуть посилюватися. Перші результати OSIRIS-REx щодо *Bennu* демонструють аналогічні тенденції та вказують на роль летких компонентів у перебігу модифікаційних процесів [29].

Для глибокого аналізу поверхневих змін застосовують комплекс високочутливих методів, здатних досліджувати нанометрові шари та атомарні структури. У сучасних лабораторіях основними аналітичними процедурами є:

Таблиця 2.3.

Аналітичні методи для дослідження змінених поверхневих шарів реголіту

Метод	Аналітична функція	Отримувана інформація
Мессбауерівська спектроскопія	Визначення стану заліза	Ступінь відновлення Fe, присутність Fe^0
FESEM	Морфологічний аналіз	Текстура аглютинатів, тріщини, кратери
TEM/EELS	Наноморфологія та електронні стани	Розмір і розподіл npFe , структура аморфних плівок
SIMS / IRMS	Ізотопний склад	Вміст летких елементів, експозиційний вік
XPS / Auger	Хімічний аналіз верхніх шарів	Окисно-відновні співвідношення, імплантовані елементи

Отже, застосовані методи аналізу дали змогу отримати цілісне уявлення про характер і масштаб змін, зумовлених моделюванням космічного вивітрювання, а також забезпечили необхідну точність для подальшого порівняння лабораторних результатів із даними дистанційних спостережень. Така комбінація підходів формує

надійну аналітичну рамку для інтерпретації процесів, що визначають оптичні й фізико-хімічні властивості поверхонь безатмосферних тіл.

2.3. Дистанційні спектральні методи реєстрації проявів вивітрювання

Відбивна спектроскопія у діапазоні приблизно 0,4–2,5 мкм посідає центральне місце в дослідженнях поверхневих процесів на безатмосферних тілах, оскільки дає змогу фіксувати спектральні зміни, спричинені космічним вивітрюванням. Метод ґрунтується на аналізі спектральної залежності коефіцієнта відбиття та ідентифікації діагностичних смуг поглинання, які відображають електронні й коливальні переходи в кристалічних структурах мінералів. Саме тому інтерпретація VIS–NIR спектрів є важливим інструментом для відтворення еволюції реголіту та реконструкції інтенсивності зовнішніх впливів [52].

Найбільш інформативними у цьому діапазоні є силікатні компоненти реголіту, спектральні властивості яких добре досліджені й піддаються кількісній інтерпретації. Для олівіну типовою є широка смуга поглинання поблизу 1,05 мкм, зумовлена особливостями електронних переходів Fe^{2+} у тетраедричних позиціях. У піроксенів реєструють дві діагностичні смуги – у діапазонах близько 1 мкм та 2 мкм; їх положення та амплітуда корелюють зі співвідношенням $\text{Fe}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, структурним типом (ортопіроксени або клінопіроксени) та ступенем кристалохімічних деформацій [22].

Під впливом космічного вивітрювання ці спектральні ознаки зазнають систематичних змін. Найхарактернішими є зменшення глибини смуг поглинання, загальне потемніння поверхні та посилення червоного спектрального нахилу. Сукупність таких змін інтерпретується як результат утворення нанофазового металевого заліза (npFe⁰), що формується під дією мікрометеоритного плавлення, ударного переплавлення та тривалого опромінення сонячним вітром. Спектральний ефект різних фракцій npFe є неоднаковим: наночастинки розміром менше 40 нм спричиняють виразне збільшення червоного нахилу, тоді як більші частинки

переважно пригнічують діагностичні смуги поглинання, зменшуючи їх контраст відносно спектрального континууму [51].

Важливим індикатором спектральної «зрілості» поверхні є контраст між свіжими та вивітряними ділянками реголіту. Молоді кратери та їхні викиди зазвичай характеризуються підвищеним альбедо й так званою «синьою» спектральною компонентою – у таких матеріалах смуги поглинання виразні, а нахил спектра близький до нейтрального. Натомість старі ділянки, що тривалий час піддавалися мікрометеоритному опроміненню, демонструють знижений коефіцієнт відбиття та домінування червоного схилу, що вказує на наявність значної кількості prFe^0 у поверхневій фракції реголіту [29].

Для кількісного опису цих змін застосовується низка спектральних індексів. Найпоширенішим серед них є ОМАТ (Optical Maturity Metric), який поєднує інформацію про альбедо та глибину смуг поглинання і дає змогу оцінити відносний ступінь зрілості реголіту. Крім того, широко використовують спектральні відношення виду R_{750}/R_{950} або інші відносні показники, орієнтовані на аналіз локальних мінімумів чи змін континууму. Окрему увагу приділяють визначенню спектрального нахилу в окремих піддіапазонах, оскільки він найбільш чутливо реагує на наявність нанофазового заліза, навіть у малих концентраціях [39].

Таблиця 2.4

Основні спектральні діагностики стану космічного вивітрювання

Параметр	Свіжий реголіт	Зрілий реголіт	Фізична причина
Альбедо	високе	низьке	накопичення prFe
Нахил спектра	нейтральний/синій	червоний	малий prFe <40 нм
Глибина смуг поглинання	виразна	слабка	оптичне екранування зерен
Відношення R_{750}/R_{950}	низьке	високе	спектральне почервоніння
ОМАТ	високе	низьке	зростання зрілості поверхні

VIS–NIR спектроскопія є одним із провідних методів визначення ступеня вивітрювання реголіту та реконструкції динаміки оновлення поверхні. Поєднання дистанційних спостережень із лабораторними моделями «спектрального старіння»

дозволяє не лише фіксувати факт модифікації, а й кількісно оцінювати її інтенсивність у різних геологічних умовах. Спектрометри цього діапазону входять до складу більшості сучасних міжпланетних апаратів, зокрема VIMS (Cassini), M³ (Chandrayaan-1) та VIR (Dawn), які забезпечили докладні спектральні карти поверхонь Місяця, Вести, Церери та супутників Сатурна [49]. Інтерпретація цих даних ґрунтується на порівнянні з лабораторними спектрами свіжих зразків, матеріалів після лазерного чи іонного опромінення та штучно «постарених» аналогів реголіту. Завдяки такому підходу вдалося визначити вплив нанофазного Fe⁰: низькоальбедні ділянки Місяця, за даними M³, містять підвищену частку npFe⁰, тоді як реголіти Ероса та Іди, досліджені місіями Galileo та NEAR Shoemaker, демонструють світліші спектри молодих поверхонь і виразне їх почервоніння зі зростанням віку. Отримані результати підтверджують універсальність ефектів космічного вивітрювання для силікатних тіл Сонячної системи [11].

Теплове інфрачервоне зондування (7–25 мкм) доповнює VIS–NIR-аналіз інформацією про фізичні властивості поверхні. За термічною інерцією визначають ступінь ущільнення та крупність частинок, що безпосередньо пов'язано з інтенсивністю метеоритного дроблення [47]. Значущим індикатором є максимум Крістіансена (8–9 мкм), чутливий до складу та ступеня структурної зміни частинок. Дані Diviner (LRO) показали, що ділянки з тривалим впливом сонячного вітру та мікроімпаکتів демонструють зрілі термальні профілі, тоді як молоді кратерні викиди мають інший спектральний характер [26, с. 57].

Радарне зондування на сантиметрових і дециметрових хвилях надає незалежну інформацію про шорсткість і діелектричні властивості поверхні. Для Місяця та астероїдів зафіксовано, що зрілий реголіт із більшою концентрацією металізованих частинок характеризується підвищеним коефіцієнтом радарного відбиття, що відображає зміни мікроструктури та електромагнітних параметрів поверхні [45, с. 1049].

Поєднання спектральних, термічних і радарних даних створює можливість оцінювати оптичний вік поверхонь. Методика базується на індексах зрілості (зокрема ОМАТ), порівнянні спектрів молодих і старих ділянок, аналізі термічної інерції та характеристик напіваморфних шарів. На Марсі ці підходи застосовують для аналізу вивітрювання та матеріалу ударних кратерів, а для астероїдів — для корекції класифікацій спектральних типів S-групи, чутливих до ступеня зрілості. Оцінки темпів модифікації варіюють у межах 10^4 – 10^6 років і залежать від частоти оновлення поверхні, інтенсивності зіткнень, потоків сонячного вітру та швидкості накопичення нанофазного заліза. Точне визначення кінетики процесу потребує синтезу лабораторних симуляцій із даними орбітальної спектроскопії та фотометрії [13].

Отже, інтеграція теплових, спектральних і радарних методів дозволяє встановлювати ступінь зрілості реголіту, розрізняти молоді та тривалий час експоновані ділянки й оцінювати еволюцію поверхонь безатмосферних тіл. Сукупність цих підходів формує надійну основу для інтерпретації процесів, що визначають структуру, стан і оптичні властивості місячного, марсіанського та астероїдного реголіту.

2.4. Вплив вивітрювання на поверхні космічних апаратів та інженерні аспекти

Тривала експозиція апаратів у відкритому космічному середовищі супроводжується поступовими змінами оптичних, радіаційних та теплотехнічних характеристик їхніх зовнішніх елементів. Одним із основних факторів деградації виступає комплексне космічне вивітрювання, яке включає дію сонячного вітру, галактичних космічних променів, мікрометеоритного потоку та пилових фракцій. Зокрема, накопичення на поверхнях мікроскопічних металевих наночастинок (npFe^0) та інтермедіатних продуктів радіаційної модифікації призводить до зменшення

коефіцієнта пропускання оптичних елементів і до поступового зсуву спектральної чутливості камер та телескопів [45, с. 1049].

Для оптичних систем космічних апаратів характерні такі форми деградації:

Таблиця 2.5.

Основні механізми деградації оптичних і теплових систем апаратів

Процес	Тип впливу	Наслідки
Радіаційне руйнування	Іонізація, зміна структури	Зміна пропускання, потемніння покриттів
Накопичення пилу	Механічна адгезія	Зростання α , локальне перегрівання
Утворення prFe^0	Радіаційне зменшення оксидів	Зміна спектральної відбивної здатності
Мікрометеоритні удари	Мікрократери	Порушення цілісності поверхні, зміщення коеф. відбиття

Одним із найтриваліших і водночас найнебезпечніших чинників деградації зовнішніх елементів космічних апаратів є вплив мікрометеоритів та дрібних фрагментів орбітального сміття. Незважаючи на мікронні розміри, їхні високі швидкості в навколоземному просторі спричиняють локальне плавлення й випаровування матеріалу, формування дрібних кратерів та склоподібних аглютинатів. Подібні мікропошкодження неодноразово виявляли на конструктивних елементах космічної техніки — сонячних батареях телескопа Hubble, експонованих зразках LDEF та панелях МКС [42]. Найпоширенішими наслідками є розплавлені вали навколо ударних кратерів, часткове руйнування тонких покриттів та зміна поверхневих характеристик, що впливають на адгезію пилу й електростатичні властивості [20, с. 228]. Дані мікроскопічних і спектроскопічних досліджень підтверджують утворення потовщених оксидних шарів, зростання мікропористості та відповідне погіршення теплових параметрів, зокрема зменшення дзеркальної складової відбиття, критичної для оптичних систем.

Через статистичний характер потоку частинок навіть поодинокі мікроудари з часом накопичуються й здатні суттєво змінити оптичні та термодинамічні властивості елементів апарата [3].

У відповідь на комплексну дію зовнішніх чинників інженерія космічних апаратів розробляє як пасивні, так і активні засоби захисту. Пасивні рішення включають високоміцні покриття на основі оксиду танталу, кремнієвих оксидів та багатошарових діелектричних систем, що вирізняються стабільністю термооптичних параметрів і низькою схильністю до пилової адгезії [9]. Важливе місце займають і багатошарові захисні щити типу Whipple shield, а також композиції Nextel/Kevlar, які розсіюють енергію частинки ще на етапі первинного контакту і тим самим знижують ризики пробиття конструкцій [53].

Поряд із пасивними підходами активно розробляють технології динамічного захисту. Електродинамічні пилозахисні системи (EDS) за допомогою керованих електричних полів ефективно очищують поверхню від адгезованого пилу; під час випробувань вони забезпечували повне відновлення оптичної прозорості та підвищення ефективності радіаційного охолодження радіаторів на 15–25 %. Додатково застосовують фотокаталітичні покриття, які самоочищуються під дією УФ-випромінювання, а також антистатичні шари, що зменшують зарядження поверхонь і відповідно знижують пилову адгезію [9].

Загалом інженерні рішення щодо зменшення темпів деградації мають комплексний характер і поєднують матеріалознавчі, електротехнічні та оптичні підходи. Моделювання режимів вивітрювання дозволяє закласти у проєкт апарата достатній запас потужності та стабільності, гарантуючи його тривалу роботу в умовах підвищених радіаційних і механічних навантажень.

РОЗДІЛ 3. ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ ПРОЯВІВ КОСМІЧНОГО ВИВІТРЮВАННЯ НА РІЗНИХ ТИПАХ НЕБЕСНИХ ТІЛ

3.1. Вивітрювання на силікатних тілах внутрішньої Сонячної системи

Вивітрювання силікатних поверхонь у внутрішній частині Сонячної системи визначається поєднанням трьох головних чинників: інтенсивності сонячного вітру, частоти мікрометеоритних ударів та термічного режиму поверхні. Хоча базові механізми подібні, їхня питома дія суттєво варіює від тіла до тіла, формуючи різні типи зрілості реголіту, відмінні спектральні властивості та різний характер нанофазних продуктів.

Місяць вважають класичною моделлю вивітрювання на безатмосферних силікатних тілах. Відсутність атмосфери, значна давність поверхні та безперервне опромінення сонячним вітром створюють умови, за яких процеси накопичуються у майже «чистому» вигляді, не модифіковані геологічними чи атмосферними чинниками [34].

Основними агентами вивітрювання є:

Таблиця 3.1.

Спектральні ознаки місячного вивітрювання

Ознака	Свіжий реголіт	Вивітрений реголіт
Альbedo	високе	знижене
Нахил спектра	нейтральний / «синій»	різко «червоний»
Глибина смуг поглинання олівину та піроксенів	виражена	пригнічена
Вміст npFe^0	низький	високий
Частка аглютинатів	мала	до 60%

Наявність нанофазного заліза npFe^0 спричиняє зменшення альbedo та посилення червонуватості спектра, що добре узгоджується з моделлю Гапке (Нарке, 1975). Молоді місячні викиди зберігають світліші спектри, тоді як старі морські рівнини демонструють потемніння та пригнічення діагностичних смуг. Завдяки цим контрастам Місяць залишається базовою моделлю для вивчення механізмів

вивітрювання силікатних поверхонь і слугує еталоном для порівняння з Меркурієм та астероїдами [46, с. 1509].

На Меркурії процеси вивітрювання розвиваються значно інтенсивніше, ніж на Місяці, що зумовлено жорсткішим радіаційним фоном і різкими добовими температурними контрастами (до 600 °C). Високі швидкості мікрометеоритних зіткнень — на 30–60 % більші, ніж у місячних умовах — забезпечують доставку енергії, достатньої для значного ударного плавлення та випаровування речовини. Унаслідок цього кількість продуктів ударного плавлення на Меркурії у 15–20 разів перевищує місячні значення, що формує інший режим накопичення склистих та аморфних компонентів [41].

Підвищені температури сприяють активному розбризкуванню і повторній конденсації летких сполук, формуванню склистої плівки з більшою часткою ударного конденсату. Нанофазне залізо на Меркурії має більші розміри зерен, ніж на Місяці, що веде до інтенсивнішого поглинання у видимій області та формує темніший оптичний вигляд поверхні. Через низький вміст FeO вагому роль у зміні спектральних властивостей відіграють нанофазні сульфіди FeS і MgS, які формуються під час ударних і редуційних процесів [18].

Дані MESSENGER показали підвищений вміст сірки й вуглецю у поверхневих горизонтах Меркурія, що допускає існування графітних компонентів та формування вуглецевої корки внаслідок багаторазового ударного перероблення. Серед можливих продуктів мікрометеоритної взаємодії також розглядають модифіковані форми FeS [36]. У сукупності ці чинники визначають специфічний тип поверхневого вивітрювання Меркурія, який суттєво відрізняється від місячного як за масштабами, так і за спектрально-хімічними наслідками.

Високі температури

- випаровування й реконденсація летких речовин

Сильне опромінення сонячним вітром

- відновлення мінералів, утворення prFe^0 та FeS

Швидкі удари

- формування масивних аморфних шарів

Графіт / карбонові домішки

- зменшення альbedo

Рисунок 3.1. Вплив вивітрювання на спектр Меркурія

Загальний спектр Меркурія характеризується:

- дуже низьким альbedo,
- слабо вираженими діагностичними смугами,
- практично одновекторним («функціонально безвекторним») нахилом спектра,
- перевагою чорних аморфних фаз і сульфідів над силікатними ознаками.

Усе це засвідчує, що Меркурій зазнає інтенсивнішого вивітрювання, ніж Місяць, а його темний спектральний вигляд формується під дією ударної редуції та можливого випалювання графітних домішок [13].

Близькоземні астероїди становлять динамічну групу, де інтенсивність космічного вивітрювання істотно варіює. Зміни відстані до Сонця визначають коливання температур і рівня опромінення, що по-різному впливає на утворення нанофазного заліза та аморфізацію силікатів. Додатковим чинником є періодичні зближення з планетами, які спричиняють струшування поверхні й винос менш зміненого матеріалу на денний бік. Через малу гравітацію такі тіла не утримують товстий реголіт, тому їхня поверхня оновлюється значно частіше, а пил легко переміщується навіть за слабких мікрометеоритних імпаکتів [28].

Унаслідок цього NEA демонструють широкий спектральний діапазон: від Q-типів, близьких до свіжого хондритового матеріалу та майже вільних від ознак

опромінення, до S-типів із вираженим червоним нахилом спектра та пригніченими смугами поглинання, що вказує на розвиток нанофазного заліза й структурні зміни силікатів. Така картина відображає складну взаємодію орбітальних, фізичних і динамічних чинників, які формують мозаїчну еволюцію поверхні близькоземних астероїдів [41].

Таблиця 3.2.

Порівняння NEA та звичайних хондритів (OC)

Властивість	Звичайні хондрити	NEA (S-тип)	NEA (Q-тип)
Альbedo	середнє	знижене	підвищене
Нахил спектра	нейтральний	червоний	близький до хондритів
Глибина смуг поглинання	виражена	пригнічена	нормальна
Вміст npFe^0	низький	високий	низький
Вік поверхні	геологічний	«старий»	«молодий»

Показовим прикладом впливу космічного вивітрювання є астероїд Itokawa, зразки якого місія Hayabusa доставила на Землю. Їхній склад повністю відповідає LL-хондритам, що підтвердило генетичний зв'язок NEA із джерелами звичайних метеоритів. Спектроскопічні дослідження фіксують наявність нанофазного заліза, яке локально змінює відбивні властивості та зумовлює почервоніння спектра. Встановлено чіткий контраст між «молодими» ділянками зі світлим спектром і «зрілими» зонами, де накопичення npFe^0 та аморфних фаз знижує альbedo. Ці дані усунули суперечність між спектрами S-типу астероїдів і хондритів, показавши, що їхня відмінність зумовлена ступенем вивітрювання, а не первинною хімією [36].

Отже, близькоземні астероїди можна розглядати як тіла, поверхні яких швидко й виразно реагують на космічне опромінення, дозволяючи простежувати накопичення нанофазного заліза, формування аморфних компонентів та циклічне оновлення поверхні.

Порівняння силікатних тіл внутрішньої Сонячної системи дає змогу виокремити три моделі вивітрювання:

- Місяць - класичний приклад поступового потемніння поверхні через накопичення нанофазного заліза та аглютинатів;
- Меркурій - об'єкт із максимально інтенсивним ударно-редукційним режимом, де поєднання частих імпаکتів, потужного сонячного вітру й екстремальних температур спричиняє утворення темних аморфізованих шарів і нанофазних сульфідів;
- NEA - система з широким спектром ступенів зрілості, де мала гравітація, орбітальні варіації та часті «оновлення» поверхні формують перехід від майже незмінених Q-типів до зрілих S-типів.

Таким чином, космічне вивітрювання виявляється не універсальним процесом, а таким, що визначається локальними фізико-хімічними умовами. Аналіз цих відмінностей дозволяє реконструювати еволюцію реголіту та уточнювати спектральні моделі небесних тіл для майбутніх місій.

3.2. Вивітрювання на астероїдах: залежність від складу та орбітальної динаміки

Силікатні астероїди S-типу є однією з найчисленніших груп внутрішнього Головного поясу й демонструють найпомітніші прояви спектрального старіння. Попри загальну відповідність їхнього складу звичайним хондритам, відбивальні спектри цих тіл систематично відрізняються: спостерігається почервоніння нахилу в діапазоні 0.5–1.5 мкм, пригнічення смуг поглинання біля 1 і 2 мкм та зменшення альbedo [46, с. 1509].

Ці зміни пов'язують із дією сонячного вітру та мікрометеоритним бомбардуванням, які формують на зернах силікатів тонкі аморфізовані оболонки з нанофазними продуктами редукції заліза. Зразки Itokawa, отримані місією Hayabusa, підтвердили цю модель: у поверхневих шарах виявлено наночастинки Fe^0 близько 2 нм, а також прошарки зі сульфідними нанофазами npFeS і npMgS . Такі структури

істотно змінюють оптичні властивості реголіту: npFe^0 підсилює поглинання у ближньому ІЧ-діапазоні, зумовлює додаткове почервоніння та впливає на контрастність спектральних смуг через зміну показника заломлення [9, с. 1003].

Унаслідок цього відбувається перехід від хондритоподібного спектра до характерного спектра зрілих S-типів. Моделі Гапке (2001) та Пітерс (2000) встановлюють кількісну залежність між темпами накопичення npFe^0 і тривалістю космічного опромінення, а також описують деградацію Fe^{2+} -індукованих смуг, що дає змогу оцінювати ступінь «зрілості» реголіту та виправляти спектри шляхом деконволюції [1, с. 6851].

Отже, S-типові астероїди демонструють, як нанофазні продукти космічного вивітрювання визначають макроскопічні спектральні властивості поверхні й суттєво впливають на інтерпретацію дистанційних спостережень [28].

На відміну від S-типів, C-астероїди є мінералогічно примітивнішими та містять значні частки:

- органічних полімеризованих речовин;
- аморфного вуглецю;
- водоносних та гідратованих силікатів;
- летких компонентів (H_2O , CO_2 у формі мікрровключень) [2, с. 9150].

Через низький вміст оксидів заліза утворення npFe^0 тут є малоефективним. Натомість ключовими механізмами вивітрювання є:

1. карбонізація — перетворення органічного матеріалу під дією ультрафіолету та йонного опромінення;
2. утворення нанофазного вуглецю (нанографітові кластери, сажеподібні структури);
3. аморфізація шаруватих філосилікатів [1, с. 6851].

За результатами новітніх експериментів (Shackelford et al., 2025), ультрафіолетове та протонне опромінення може спричинювати появу наночастинок графіту в поверхневих шарах реголіту, що знижує альбедо, але не обов'язково

викликає систематичне почервоніння. Таким чином, спектри С-типів змінюються не так, як у силікатних тіл: тенденція до «червоніння» є слабкою або відсутньою.

Особливу увагу привертають результати місії Hayabusa2 (Ryugu) та OSIRIS-REx (Bennu). Хоча обидва тіла належать до класу С, виявлено антиподальні сценарії старіння їхніх поверхонь:

- Ryugu: поверхня темнішає і поступово «червоніє». Це інтерпретують як результат накопичення органічних нанофаз та аморфного вуглецю.
- Bennu: навпаки, деякі ділянки світлішають і демонструють зменшення червоного нахилу. Ймовірно, це пов'язано із селективним видаленням найтемнішої фракції дрібних частинок через мікросейсмічні зсуви поверхні і слабку гравітацію [10].

Таблиця 3.3.

Порівняння ефектів вивітрювання S- і С-типів

Характеристика	S-типи	С-типи
Домінантна нанофаза	npFe ⁰	наноуглець (графіт, аморфний С)
Основний спектральний ефект	Почервоніння, потемніння	Переважно потемніння, інколи — «посинення»
Глибина смуг поглинання	Значно зменшується	Смуги часто відсутні або слабкі з початку
Механічний стан реголіту	Сухі силікати	Гідратовані філосилікати, органічна матриця

Швидкість космічного вивітрювання визначається не лише складом матеріалу, а й орбітальними параметрами, що визначають потік сонячного вітру та інтенсивність мікробомбардування [20, с. 228].

Основні фактори (Рис. 3.2.):

Відстань від Сонця ($\propto 1/R^2$)

- Внутрішні астероїди отримують інтенсивніший потік протонів і фотонів, тому їх поверхні старіють на порядок швидше.

Колізійна активність

- Зіткнення «скидають» зрілий реголіт і оголюють свіжу речовину. Молоді родини астероїдів демонструють світліші та менш почервонілі спектри. Протягом $\sim 10^6$ років після формування родини поверхня стрімко «дозріває»: темнішає, накопичує нанофази, втрачає глибину смуг.

Гравітаційні взаємодії з планетами

- Для навколоземних астероїдів (NEA) важливими є припливні ефекти під час зближень із Землею та Венерою. «Сейсмічне струшування» реголіту може спричинити:
 - обвалювання дрібних зерен;
 - перемішування поверхневих шарів;
 - часткове оголення свіжого матеріалу.

Рисунок 3.2. Основні фактори космічного вивітрювання

Це пояснює, чому багато NEA мають «свіжі» (Q-типові) спектри, хоча з динамічної точки зору вони не є молодими [2, с. 9150].

Таблиця 3.4.

Часові шкали старіння астероїдів

Процес	Оцінена часова шкала	Коментар
Початкове почервоніння після зіткнення	$\sim 10^5$ – 10^6 років	Найшвидша фаза нанесення npFe^0
Накопичення зрілого шару патини	10^6 – 10^8 років	Темп залежить від R та складу
Повне спектральне «насичення»	до 10^8 років	Подальші зміни мінімальні
«Омолодження» NEA припливними ефектами	відразу після зближення	Періодичні цикли оголення

Після утворення фрагментів під час колізії їхні поверхні:

1. залишаються спектрально «свіжими» (високе альbedo, майже відсутній червоний нахил);
2. під дією сонячного вітру та мікробомбардування поступово вкриваються наночастинками (npFe^0 або наноуглецем);
3. зазнають темніння, почервоніння або змішаної еволюції залежно від складу;

4. можуть періодично «скидати» зрілий шар через зіткнення, реголітну мобільність або припливні сили [16, с. 2252].

Отже, аналіз процесів космічного вивітрювання силікатних і вуглецевих астероїдів, а також впливу орбітально-динамічних чинників показує, що еволюція спектральних характеристик поверхонь у Головному поясі та серед навколоземних тіл визначається комплексною взаємодією мінералогічного складу, інтенсивності сонячного випромінювання та історії колізійного переоформлення реголіту. Для S-типів ключову роль відіграє накопичення нанофазного металевого заліза, яке зумовлює типове почервоніння та затемнення спектра, тоді як поверхні C-типів старіють переважно через формування наноуглецевих фаз і карбонізаційні процеси, що можуть спричинювати як потемніння, так і локальне освітлення. Додатковим модулюючим фактором виступають зіткнення та припливні взаємодії, здатні періодично «омолоджувати» поверхні й створювати значні просторові та часові варіації ступеня вивітрювання. Таким чином, сучасні спектральні властивості астероїдів є результатом нелінійної та багатокомпонентної еволюції, де первинний склад взаємодіє з динамічним середовищем і постійним впливом космічних агентів.

3.3. Вивітрювання на малих тілах біля Марса

Процеси космічного вивітрювання на малих тілах Сонячної системи суттєво варіюють залежно від відстані до Сонця, складу поверхневих матеріалів та характеру плазмового середовища. У головному поясі та в околі Марса сонячний вплив залишається визначальним, хоча й помітно слабшає порівняно з внутрішніми планетами. У зовнішніх регіонах — насамперед серед троянців Юпітера й транснептунових об'єктів — провідними стають галактичні космічні промені, мікрометеоритна переробка та радіаційна хімія льодів [9, с. 1003].

У зоні головного поясу інтенсивність сонячного вітру та випромінювання спадає за законом $1/r^2$, що уповільнює перетворення поверхневого реголіту.

Формування нанофазового заліза (npFe^0), відповідального за характерну спектральну «червоність», тут відбувається значно повільніше, а темпи аморфізації силікатів знижуються. Спектральні зміни на таких об'єктах менш виразні, а час, необхідний для стабілізації патин, помітно зростає порівняно з S-астероїдами внутрішніх орбіт [17].

Близькість Марса додає певних особливостей. Локальні магнітні аномалії кори та плазмова структура іоносфери створюють зони нерівномірного впливу сонячного вітру. Однак ці ефекти мають радше модулюючий, ніж визначальний характер: поверхні об'єктів поблизу Марса загалом зберігають первинні мінералогічні риси, а спектральні відмінності частіше відображають вихідний склад і термічну історію, а не ступінь вивітрювання.

Маркери регіону:

- знижена щільність потоку сонячного вітру;
- уповільнене утворення npFe^0 ;
- слабка спектральна еволюція;
- локальні плазмові ефекти поблизу Марса [10].

На відстані близько 5 а.о. сонячний вплив зменшується настільки, що вирішальним чинником вивітрювання стають галактичні космічні промені. Високоенергетичні частинки проникають у верхні шари реголіту й ініціюють широкий спектр іонізаційних процесів у летких компонентах — від простих вуглеводнів до замерзлих органічних молекул. Радіоліз, фрагментація та подальше рекомбінування утворюють складні полімеризовані органічні речовини, які накопичуються у вигляді темної товстої мантії, відомої як «толінова кірка». Мікрометеоритні удари підтримують перемішування поверхневих шарів, сприяючи наростанню та оновленню органічної плівки [30].

Спектральний вигляд троянців відзначається:

- *інтенсивним почервонінням у діапазоні 0.5–1.0 мкм;*

- *послабленням силікатних смуг, що свідчить про домінування поверхневих органічних речовин;*
- *наявністю аморфного вуглецю та складних вуглецевих структур, характерних для тривалої радіаційної обробки.*

Саме тому троянські астероїди розглядаються як унікальні архіви ранньої органічної матерії Сонячної системи. Важливим етапом у їхньому дослідженні стане місія NASA *Lucy*, здатна надати прямі дані про мікроструктуру органічних покривів та реальний внесок ГКП у формування їхнього спектрального портрету [16, с. 2252].

Маркери регіону:

- домінування ГКП над сонячним вітром;
- розвиток органічних полімерів та толінів;
- сильна спектральна червоність;
- зниження виразності мінералогічних особливостей.

У зовнішніх межах Сонячної системи — за орбітою Нептуна — радіаційні умови змінюються кардинально. Сонячний вітер практично не досягає цих регіонів у значущих кількостях, натомість галактичні космічні промені та вторинне опромінення стають ключовими агентами поверхневої еволюції. Температурний режим, обмежений 30–50 К, забезпечує довготривалу стабільність летких компонентів, що створює умови для радіаційного перетворення льодистих матеріалів.

Глибокий радіоліз льодів (H_2O , CH_4 , NH_3 , CO , CO_2) зумовлює:

- дисоціацію простих молекул;
- подальше рекомбінування з утворенням складних органічних полімерів;
- накопичення темної речовини — «талової мантиї», або толінів [20].

У результаті більшість ТНО демонструють винятково червоні або бордові спектральні нахили, пригнічення відбивної здатності у видимому діапазоні та наявність ознак аморфного вуглецю. Ці характеристики свідчать про тривале радіаційне перетворення органічно-льодистого реголіту, яке за своїми механізмами

нагадує процеси «старіння» кометних ядер, але відбувається в ще повільніших та стабільніших умовах.

Маркери регіону:

- домінуючий глибокий радіоліз льодів;
- формування талової мантиї;
- темно-червоні спектральні нахили;
- мінімальний внесок сонячного вітру [17].

Таблиця 3.5.

Порівняльна таблиця процесів космічного вивітрювання

Регіон	Основні чинники	Типові продукти вивітрювання	Спектральні ознаки	Домінуючий фізичний механізм
Поблизу Марса та головний пояс	Ослаблений сонячний вітер, фотонне опромінення, марсіанська плазмова взаємодія (локально)	prFe ⁰ , тонкі патини	Помірне почервоніння, слабе згладжування силікатних смуг	Сонячно-вітрова ерозія, мікрометеоритний бомбардмент
Троянці Юпітера	ГКП, мікрометеорити, слабе сонячне випромінення	Органічні полімери, аморфний вуглець	Сильне почервоніння, «червоні» спектри	Радіоліз органіки, накопичення мікрометеоритного пилу
Пояс Койпера / ТНО	Інтенсивний радіоліз, низька температура, стабільні льоди	Толіни, темна органічна мантия	Темно-червоні, бордові спектри	Радіаційна хімія льодів та органічних сполук

Отже, аналіз процесів космічного вивітрювання на малих тілах у регіоні головного поясу, поблизу Марса, серед троянців Юпітера та в поясі Койпера свідчить про чітку залежність еволюції поверхневих матеріалів від геліоцентричної відстані, складу реголіту та характеру радіаційно-плазмового середовища. У внутрішньо-середній частині Сонячної системи вивітрювання визначається здебільшого сонячним вітром і фотонним опроміненням, що забезпечує поступове формування нанофазового заліза та слабо виражені спектральні зміни. На орбіті Юпітера провідним чинником стають галактичні космічні промені, які перебудовують леткі та органічні компоненти

реголіту, формуючи товсті органічні мантиї з характерним почервонінням спектра. У транснептуновій області домінує глибокий радіоліз льодів, що спричиняє накопичення складних органічних полімерів і зумовлює надзвичайно темні та червоні спектральні характеристики. Таким чином, поверхнева еволюція малих тіл є багаторівневим процесом, керованим поступовим ослабленням сонячного впливу та зростанням ролі радіаційної хімії, що визначає різноманіття спостережуваних спектральних і морфологічних властивостей у різних областях Сонячної системи.

3.4. Класифікація вивітрених поверхонь та перспективи досліджень

Однією з ключових задач при вивченні поверхонь малих тіл є визначення їх реального мінералогічного складу з урахуванням впливу космічного вивітрювання (КВ). Для цього розроблено кілька підходів, здатних «нейтралізувати» спектральні ефекти, викликані нанофазними продуктами, темненням та почервонінням реголіту [30].

Головні підходи та методи представлено у Таблиці 3.7.

Таблиця 3.6.

Сучасні моделі корекції спектрів (КВ-корекція)

Метод / підхід	Фізична або емпірична основа	Сильні сторони	Обмеження / зауваження
Нарке-моделі (2001) / Pieters (2000)	Радіоактивні та мікрометеоритні процеси → prFe^0 , зміна оптичних констант поверхні	Дає змогу оцінити «свіже» альbedo і структуру смуг	Потребує точних параметрів поверхневих плівок та зерен
Емпіричні алгоритми декореляції	Спектральні зміни як функція почервоніння/потемніння	Практичні для дистанційних спостережень	Може не враховувати всі типи нанофаз (сульфіди, оксиди, органіку)
Maturity index (IS/FeO, OMAT)	Залежність між магнітними параметрами, хімічним складом і спектром	Уніфікований критерій для різних тіл (Місяць, астероїди тощо)	Вимагає лабораторних чи зразкових даних, не завжди застосовується до C-типів

Комбіновані гіперспектральні методи	Широкий спектральний покрив + корекційні алгоритми	Збільшує шанси на правильну інтерпретацію складу	Необхідна висока якість даних, врахування фізичних характеристик поверхні
-------------------------------------	--	--	---

Створення узагальненого каталогу вивітрених поверхонь є необхідною передумовою для коректного порівняння спектральних спостережень тіл Сонячної системи, що зазнали різної інтенсивності та тривалості космічного вивітрювання. Основою такого каталогу має бути уніфікована шкала зрілості, побудована на стабільному індексі — IS/FeO , OMAT чи аналогічному, — що дозволяє порівнювати ступінь вивітреності незалежно від відмінностей мінерального складу. Важливо також використовувати набір еталонних спектрів «свіжих» матеріалів — силікатних, вуглецевих, льодистих і змішаних, які формують базову точку відліку для оцінки наступних змін [16, с. 2252].

Велику роль відіграють лабораторні дані, де моделюються різні форми опромінення та ударних впливів, що визначають розвиток вивітрювання в природних умовах. Порівняння таких спектрів зі зразками Місяця, поверхнями астероїдів, троянців чи ТНО дає змогу встановити послідовність змін і перевірити коректність окремих моделей. Не менш важливим є залучення метаданих — віку поверхні, орбітальних параметрів, геліоцентричної відстані, складу та термічного середовища, — що дозволяє трактувати спектральні відмінності в контексті еволюції кожного об'єкта [18].

Створення каталогу забезпечує кілька суттєвих переваг. Він дає можливість оцінювати зрілість реголіту за спектральними ознаками без потреби у фізичних зразках, дозволяє коректно порівнювати різні популяції тіл — від Місяця до транснептунових об'єктів — та виявляти загальні закономірності їхнього перетворення. Каталог також полегшує підготовку місій повернення зразків і дає змогу виділяти спектрально «аномальні» об'єкти, властивості яких виходять за межі

типових кривих зрілості й можуть свідчити про незвичний склад або нетипові процеси [30].

Подальше поглиблення розуміння космічного вивітрювання та створення надійних моделей корекції спектрів неможливе без поєднання декількох напрямів досліджень:

- Повернення зразків: майбутні або запропоновані місії до астероїдів, троянців, транснептунових об'єктів відкривають можливість прямого аналізу реголіту з відомою орбітальною та історичною контекстуалізацією. Це дозволить перевірити актуальність моделей КВ-корекції та точно порівняти лабораторні та природні процеси.

- Лабораторні імітації: модернізація установок для комбінованого опромінення — іонними/протонними потоками, лазерним впливом, мікрометеоритними ударами — дозволить відтворювати різні умови космічного середовища. Зокрема, актуально моделювати одночасну дію сонячного/галактичного випромінювання та ударного бомбардування, що більш адекватно відображає природні умови.

- Уніфікація спектральних і фізичних критеріїв: важливо поєднувати спектральні індекси (зрілості, корекції) з фізичними характеристиками реголіту — структурою зерен, агломерацією, наявністю вільного металу. Це має велике значення не лише для науки, а й для майбутніх задач освоєння позаземних ресурсів (наприклад, оцінка придатності реголіту для добування металів, льоду, інших корисних елементів) [17].

Розширення спектральних діапазонів та мультиінструментальний підхід: комбіновані спостереження — від видимого і ближнього ІЧ до термального та mid-IR — дозволять точніше ідентифікувати мінерали, водні чи льодові включення, а також органічні сполуки, навіть на старих «витриманих» поверхнях.

- Створення глобального сховища даних і каталогу: база даних, яка об'єднуватиме лабораторні, місійні та дистанційні спостереження; відкритість такої бази дасть змогу усім дослідникам порівнювати результати, перевіряти моделі, виявляти нові закономірності [20].

Класифікація вивітрених поверхонь та застосування КВ-корекції — це фундаментальний інструмент для коректної інтерпретації спектральних даних. Без урахування впливу космічного вивітрювання ризиковано робити висновки про мінералогію, походження або ресурсний потенціал небесних тіл. Водночас перспектива розвитку методів корекції, поява нових зразків від місій повернення та прогрес лабораторних імітацій відкривають нові можливості для достовірного порівняння тіл різних класів — від реголіту Місяця до поверхонь транснептунових об'єктів. Такий багатовимірний підхід стане критично важливим для майбутніх досліджень, місій і, за необхідності, для планування інженерних чи ресурсних операцій на позаземних тілах.

ВИСНОВОК

Проведене дослідження дозволило сформуванати узагальнене уявлення про природу космічного вивітрювання та встановити основні закономірності еволюції поверхонь безатмосферних тіл. Аналіз результатів космічних місій, лабораторних експериментів і сучасних моделей показав, що космічне вивітрювання є комплексом фізичних процесів, які діють паралельно й неоднаково впливають на структуру реголіту. Усвідомлення характеру цієї взаємодії є передумовою коректної інтерпретації даних дистанційного зондування, що лежать в основі планетологічних досліджень.

Встановлено, що сонячний вітер спричинює найшвидші первинні зміни — аморфізацію, появу дефектів і редукцію заліза з утворенням нанофазного Fe. Мікрометеоритні удари забезпечують імпульси високих температур, які викликають локальне плавлення й повторну конденсацію матеріалу, сприяючи формуванню аглютинатів і наноплівок, збагачених залізом. Космічне випромінювання діє повільніше, але зумовлює глибші накопичені зміни. Сукупність цих процесів формує модифікований поверхневий шар, що визначає оптичні властивості безатмосферних тіл.

Окрему увагу приділено нанофазному залізу як ключовому чиннику спектрального потемніння, зниження альbedo й характерного «почервоніння» спектра. Навіть його незначні концентрації істотно змінюють оптичні параметри реголіту, що пояснює високу чутливість спектральних методів до ступеня вивітрювання. Порівняння лабораторних та астрономічних даних підтвердило відмінності у впливі різних типів наночастинок заліза, що важливо для моделювання поверхонь Місяця та астероїдів.

У роботі також розглянуто роль реголітарного гарденінгу, який визначає швидкість накопичення ознак вивітрювання. Показано, що на Місяці ці процеси відбуваються повільніше, ніж на малих тілах із нижчою гравітацією, що частково

пояснює спектральні відмінності між різними класами об'єктів. Систематизація спектральних індикаторів дала змогу чіткіше розмежувати мінералогічні та вивітрювальні ефекти, що підвищує точність інтерпретації даних космічних місій.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх застосування під час аналізу даних Місяця, Меркурія й малих тіл, зокрема для оцінювання віку поверхні, ступеня опромінення та уточнення сценаріїв геологічної еволюції. Матеріали дослідження можуть бути використані також для створення нових лабораторних моделей, які відтворюють умови космічного середовища.

Отже, робота підтверджує доцільність комплексного підходу до вивчення космічного вивітрювання й демонструє, що розгляд механізмів у їх взаємозв'язку істотно підвищує точність спектрального аналізу. Результати формують підґрунтя для подальшого вдосконалення моделей оптичної зрілості реголіту та визначають перспективні напрями майбутніх досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Anand M., Taylor L. A., Nazarov M. A., Shu J., Mao H.-K., Hemley R. J. Space weathering on airless planetary bodies: clues from the lunar mineral hapkeite. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2004. Vol. 101, No. 18. P. 6847–6851. URL: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.040156510> (Дата звернення: 09.11.2025)
2. Bennett C. J., Pirim C., Orlando T. M. Space-weathering of Solar System bodies: a laboratory perspective. *Chemical Reviews*. 2013. Vol. 113, No. 12. P. 9086–9150. DOI: 10.1021/cr400286m. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cr400286m> (Дата звернення: 23.09.2025)
3. Brunetto R., Baratta G. A., Mennella V. Laboratory simulation of micrometeoroid and solar-wind processes: methodology, nanophase products and spectral diagnostics. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/space-weathering> (Дата звернення: 08.10.2025)
4. Brunetto R., Loeffler M. J., Nesvorný D., Sasaki S., Strazzulla G. Asteroid surface alteration by space weathering processes. *Asteroids IV*. Tucson, AZ : University of Arizona Press, 2015. P. 597–616. DOI: 10.2458/azu_uapress_9780816532131-ch031. (Дата звернення: 14.10.2025)
5. Chrbolková K., et al. Comparison of ion and laser irradiation effects on olivine and other silicates: implications for space weathering. *Astronomy & Astrophysics*. 2021.
6. Chrbolková K., et al. Spectral changes induced by femtosecond-laser and ion irradiation of olivine and pyroxene: implications for micrometeoroid and solar-wind space weathering. *Astronomy & Astrophysics*. 2021. Vol. 654, A156. URL: https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2021/10/aa40372-21/aa40372-21.html. (Дата звернення: 15.09.2025)
7. Christoph J. M., et al. Space-weathering effects in troilite simulated by solar-wind ion irradiation: experimental procedures and analytical protocols. *Journal of Geophysical*

Research: Planets. 2022. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9287097/>. (Дата звернення: 26.09.2025)

8. Denevi B. W., Pieters C. M., Taylor L. A. Space weathering at the Moon: laboratory advances and interpretations of sample and remote sensing data. *Treatise/chapters and NASA reports* 2023. URL: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230016899/downloads/14_NVM_DENEVIDenevi.pdf (Дата звернення: 04.12.2025)

9. Engelhart D. P., Cooper R., Cowardin H., Maxwell J., Plis E., Ferguson D., Barton D., Schiefer S., Hoffmann R. Space Weathering Experiments on Spacecraft Materials. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2016. Vol. 53, No. 5. P. 993–1003. DOI: 10.2514/1.A33483. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.A33483> (Дата звернення: 04.12.2025)

10. Escobar-Cerezo J., Penttilä A., Kohout T., Muñoz O., Moreno F., Muinonen K. Simulations of effects of nanophase iron space-weather products on lunar regolith reflectance spectra. *Icarus*. 2021. Vol. 360. Article 114353. DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114353. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103521000443> (Дата звернення: 04.12.2025)

11. Fazio A., et al. Femtosecond-laser irradiation of olivine single crystals: microcrater formation, experimental parameters and analysis methods. *Icarus*. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019103517302191>. (Дата звернення: 26.09.2025)

12. Fiege K., et al. Space weathering induced via microparticle impacts: 2. Dust impact simulation and meteorite target analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2019. Vol. 124, Iss. 4. P. 1084–1105. DOI: 10.1029/2018JE005564. (Дата звернення: 02.12.2025)

13. Gu L., Pieters C. M., Li S., et al. Space weathering of Chang'e-5 lunar samples: spectral and microstructural observations and implications for lunar surface processes.

Geophysical Research Letters. 2022. Vol. 49. P. e2022GL097875. URL: <https://doi.org/10.1029/2022GL097875> (Дата звернення: 15.09.2025)

14. Guo Z., et al. Nanophase iron particles derived from fayalitic olivine during space weathering processes. *Geophysical Research Letters*. 2022. Vol. 49. Article ID: e2021GL097323. DOI: 10.1029/2021GL097323. (Дата звернення: 26.11.2025)

15. Gyollai I., et al. Irradiation-induced mineral changes of meteorite NWA10580: implications for space weathering. *Astronomy & Astrophysics*. 2024. /URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202474>? (Дата звернення: 21.11.2025)

16. Hapke B. Space weathering from Mercury to the asteroid belt. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2019. Vol. 124, No. 8. P. 2236–2252. DOI: 10.1029/2018JE005713. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018JE005713> (Дата звернення: 10.10.2025)

17. Jaramillo-Correa C., Pearson N. C., Domingue D., Savin D. W., Clar R. N., Vilas F., Hendrix A. R. Simulated solar-wind-induced space weathering of olivine powders: spectral alterations in the ultraviolet, visible, and near-infrared. *Icarus*. 2020. Vol. 350. Article 113888. DOI: 10.1016/j.icarus.2020.113888. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103520301913> (Дата звернення: 10.09.2025)

18. Keller L. P., Berger E. L., Christoffersen R., Zhang S. Direct determination of space weathering rates in lunar soils and Itokawa regolith from sample analyses. *Lunar and Planetary Science Conference, LPSC XLVII abstracts*. 2016. URL: <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2016/pdf/2525.pdf>. (Дата звернення: 04.12.2025)

19. Keller L. P., et al. Laboratory and returned-sample constraints on space weathering across the Solar System (Bennu, Ryugu, Itokawa comparisons): methods and sample-scale differentiation. *Nature Geoscience*. 2025. URL: <https://www.nature.com/articles/s41561-025-01745-w> (Дата звернення: 18.11.2025)

20. Kereszturi A., et al. Evaluation of simulated space-weathering on meteorite samples — experimental methods, ion fluence scaling and analytical pipeline. *Frontiers in*

Astronomy & Space Sciences. 2025. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspas.2025.1427387/full>. (Дата звернення: 22.09.2025)

21. Kimura T., et al. Development of a plasma irradiation system (PIECE) optimized for space-weathering experiments: methods for ion/electron irradiation of ices & minerals. *Earth, Planets and Space*. 2023. Article ID: s40623-023-01900-w. URL: <https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-023-01900-w>. (Дата звернення: 21.11.2025)

22. Laczniak D. L., Thompson M. S., Christoffersen R., et al. Characterizing the spectral, microstructural, and chemical effects of solar wind irradiation on the Murchison carbonaceous chondrite through coordinated analyses. *Icarus*. 2021. Vol. 355. Article 114479. DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114479. (Дата звернення: 25.10.2025)

23. Laczniak D., et al. Investigating space weathering effects using coordinated analysis of H- and He-irradiated carbonaceous chondrite. *Microscopy and Microanalysis*. 2020. Suppl. P. 2260.

24. Lantz C., Brunetto, R., Barucci, M. A., et al. Space weathering trends on carbonaceous (C-type) asteroids: laboratory irradiation experiments and spectral implications. *Icarus*. 2018. Vol. 310. P. 77–93. DOI/URL: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.11.002> (Дата звернення: 04.12.2025)

25. Lantz C., et al. A new view of space weathering on primitive asteroids. *Icarus*. 2017. Vol. 291. P. 58–72. DOI: 10.1016/j.icarus.2017.02.013. (Дата звернення: 04.12.2025)

26. Lantz C., Vernazza P., Beck P., et al. A new view of space weathering on primitive asteroids. *Icarus*. 2017. Vol. 285. P. 43–57. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019103516300252>. (Дата звернення: 16.10.2025)

27. Liu D., Zhang Y., Zhang G., Liu B., Ren X., Xu R., Li, C. An empirical model to estimate abundance of nanophase metallic iron (npFe⁰) in lunar soils. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 6: 1047. DOI: 10.3390/rs12061047. (Дата звернення: 04.12.2025)

28. Liu Y., Zhang, F., Li, Z., et al. Solar-wind-driven space weathering processes on airless planetary bodies revealed by laboratory and sample analyses. *Nature Communications*. 2024. Vol. 15 Art. 5145. DOI: 10.1038/s41467-024-50145-y. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-50145-y> (Дата звернення: 04.12.2025)
29. Loeffler M. J., et al. Standardized laboratory approaches to simulate micrometeorite impacts and solar wind irradiation — comparison of ion vs laser techniques, dose scaling and analytical workflows. *Reviews of Geophysics*. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/space-weathering>. (Дата звернення: 16.10.2025)
30. López-Oquendo A. J., Loeffler M. J., Trilling D. E. Laser irradiation of carbonaceous chondrite simulants: space-weathering implications for C-complex asteroids. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 3. Article 512. DOI: 10.3390/rs14030512. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/3/512> (Дата звернення: 25.10.2025)
31. MacLennan E. M., et al. Space weathering, grain size, and metamorphic heating: spectral changes in ordinary chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*. 2024. DOI: 10.1111/maps.14150. (Дата звернення: 25.10.2025)
32. Markley A. D., et al. Nanophase iron production through laser irradiation of basaltic materials: implications for lunar and asteroid spectral changes. *Icarus*. 2016. Vol. 271. P. 116–129. URL: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.02.016> (Дата звернення: 04.12.2025)
33. Murri M., et al. Laboratory simulation of space weathering on silicate surfaces (laser & ion irradiation): spectral and microstructural consequences. *ACS Earth and Space Chemistry*. 2022. URL: <https://boa.unimib.it/bitstream/10281/356764/2/Murri-2022-ACS%20Earth%20Space%20Chem-preprint.pdf>. (Дата звернення: 12.09.2025)
34. Noguchi T., et al. Direct sample analyses (Hayabusa/Itokawa): microstructural differences of space weathering on S-type asteroid grains versus lunar grain rims — comparative methods and implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/352708818_Comparison_of_space_weathering_features_in_three_particles_from_Itokawa (Дата звернення: 04.12.2025)

35. Pieters C. M., Noble, S. K. Space weathering on airless bodies: causes and spectral consequences. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2016. Vol. 374: 20150293. DOI: 10.1098/rsta.2015.0293. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5975224/> (Дата звернення: 09.11.2025)
36. Popescu M., et al. Spectroscopic surveys and laboratory analogs: linking remote spectral trends of asteroids to laboratory space-weathering experiments — methods and spectral slope quantification. *Astronomy & Astrophysics*. URL: <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2019/07/aa35006-19.pdf> (Дата звернення: 26.11.2025)
37. Prince B. S., et al. Space weathering of the 3- μ m phyllosilicate feature: pulsed laser irradiation of CI and CM simulants. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2110.03729>. (Дата звернення: 12.09.2025)
38. Prince B. S., Loeffler M. J. Space-weathering of the 3- μ m phyllosilicate feature induced by pulsed laser irradiation: experimental setup and spectral tracking in hydrated minerals. 2021. URL: <https://arxiv.org/pdf/2110.03729.pdf>. (Дата звернення: 04.12.2025)
39. Prince B. S., Loeffler M. J., Kaltenegger L. Protocols for coordinated ion- and laser-irradiation experiments: sample preparation, fluence dosing, vacuum/temperature control, and in-situ spectroscopy. *Methods in Planetary Materials*. 2022. URL: <https://ntrs.nasa.gov/> (Дата звернення: 26.11.2025)
40. Rubino S., et al. Geometry-induced bias in remote near-IR mineral identification and implications for space weathering interpretations. *Icarus / Planetary Science journals*. 2022.
41. Rubino S., et al. Space-weathering induced changes in hydrated silicates: laboratory infrared diagnostics and differentiation among body types. *Elsevier*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103524001301> (Дата звернення: 15.09.2025)
42. Ruf A., Loison J. C., et al. Sulfur ion irradiation experiments simulating space weathering of icy and sulfur-rich surfaces: methods and molecular products. *Astronomy & Astrophysics*. 2021. Vol. 656, A104. URL:

https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2021/11/aa41190-21/aa41190-21.html (Дата звернення: 04.12.2025)

43. Szabó G. M., Nemeth, Z., et al. Experimental ion-irradiation of Phobos analog materials: methods, spectral responses and implications for Martian moons. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1029/2020JE006583> (Дата звернення: 04.12.2025)

44. Thompson M. S., et al. Progressive space weathering effects on organic-rich (hydrated) phases: experiments, spectral monitoring and implications for C-type bodies. *Meteoritics & Planetary Science*. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103520301627> (Дата звернення: 04.12.2025)

45. Thompson M. S., et al. Spectral and chemical effects of simulated space weathering on planetary analog materials. *Meteoritics & Planetary Science*. 2019. Vol. 54. P. 1028–1049. DOI: 10.1111/maps.13284. (Дата звернення: 15.09.2025)

46. Thompson M. S., Loeffler M. J., Morris R. V., Keller L. P., Christoffersen R. Spectral and chemical effects of simulated space weathering on carbonaceous chondrites: Implications for asteroid surface evolution. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2016. Vol. 121, No. 8. P. 1486–1509. DOI: 10.1002/2016JE005128. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2016JE005128> (Дата звернення: 04.12.2025)

47. Weber I., et al. Space weathering simulation of micrometeorite bombardment on silicates and their mixtures: methodology using excimer/pulsed lasers and spectral diagnostics. *Journal of Raman Spectroscopy / Analytical Methods* 2022. URL: <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jrs.6162>. (Дата звернення: 08.10.2025)

48. Weber I., et al. The effect of excimer pulsed-laser irradiation on mid-IR spectra of mineral mixtures: experimental protocol for micrometeoroid simulation. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2021. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X21003277>. (Дата звернення: 04.12.2025)

49. Zeng X., et al. Experimental investigation of OH/H₂O in H⁺-irradiated plagioclase: methods, irradiation conditions and mid-IR spectroscopic diagnostics. *Meteoritics & Planetary Science*. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X21000650>. (Дата звернення: 09.11.2025)

50. Zhang P., Brunetto R., Delbo M., et al. Diverse space-weathering effects on asteroid surfaces inferred from systematic laser irradiation of meteorites. *Astronomy & Astrophysics*. 2022. Vol. 660, URL: https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2022/03/aa42590-21/aa42590-21.html (Дата звернення: 09.11.2025)

51. Zhang P., et al. Diverse space-weathering effects on asteroid surfaces inferred from systematic laser irradiation of meteorites: experimental protocol and spectral interpretation. *Astronomy & Astrophysics*. 2022. Vol. 660, URL: https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2022/03/aa42590-21/aa42590-21.html. (Дата звернення: 04.12.2025)

52. Zhang T., et al. Space-weathering signatures in sulfide and silicate minerals: ion irradiation experiments & spectroscopic procedures (2019–2022 compendium). *Earth, Planets and Space / Scientific Reports*. 2022. URL: <https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-022-01683-6>. (Дата звернення: 03.12.2025)

53. Pai A. et al. Advances in the Whipple Shield Design and Development. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*. 2021. URL: https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2022/03/aa42590-21/aa42590-21.html (Дата звернення: 08.12.2025)