

Бердянський державний педагогічний університет
Факультет фізико-математичної, комп'ютерної та технологічної освіти
Кафедра фізики та методики навчання фізики

Випускна кваліфікаційна робота
на здобуття освітнього ступеня магістр на тему:

**Дослідження фазового та компонентного складу
метеориту Юртук**

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу, групи М2ПФН
Спеціальності:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
Владислав БОНДАРЕНКО

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф. Яна СИЧІКОВА

(прізвище та ініціали)

Рецензент: д.фіз.-мат.н., проф. Інституту
фізики твердого тіла Латвійського
університету Анатолій ПОПОВ

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИВЧЕННЯ АСТЕРОЇДІВ ТА МЕТЕОРИТІВ.....	9
1.1 Історія вивчення астероїдів та метеоритів.....	9
1.2 Фізичні властивості астероїду Веста 4.....	12
1.3 Метеорити клану говардит, евкріт і діогеніт (HED).....	24
1.4 Історія метеориту Юртук.....	32
1.5 Повернення Юртука - нова глава в українських дослідженнях.....	37
РОЗДІЛ II. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	39
1.1 Обладнання та інструменти.....	39
1.2 Опис процедур та експериментів.....	42
1.3 Аналіз даних.....	46
РОЗДІЛ III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	49
2.1 Морфологічні властивості метеориту Юртук.....	50
2.1.1 Загальна характеристика метеориту.....	50
2.1.2 SEM-аналіз поверхні метеориту.....	51
2.1.3 SEM-аналіз розколу метеориту.....	57
2.1.4 SEM-аналіз фьюжн-плівки.....	63
2.2 Хімічні властивості метеориту Юртук.....	68
2.2.1 Коротка характеристика мінералів, що містяться в метеоритах з астероїду 4 Веста.....	68
2.2.2 Хімічний склад поверхні метеориту Юртук.....	70
2.2.3 Хімічний склад внутрішніх шарів метеориту.....	76
2.2.4 Хімічний аналіз фьюжн-плівки.....	81
2.3 XRD-спектри і дослідження фазового стану.....	86
ВИСНОВКИ.....	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	94

ВСТУП

Актуальність теми: У XXI столітті людство продовжує розвивати нові технології та пристрої, які значною мірою впливають на наше майбутнє. Але є ще такі місця, які досі залишаються частково невідомими, незважаючи на їх дослідження – це далекий космос, планети, зорі, метеорити.

Тема освоєння космосу є дуже перспективною і має значний потенціал з різних причин. Однією з головних є наукові відкриття, адже це допомагає нам зрозуміти історію створення всесвіту, походження небесних тіл. Деякі технології які планувалося використовувати у космосі знайшли своє призначення і на планеті Земля у таких галузях як медицина, зв'язок, матеріалознавство. Доволі часто задля космічних програм деякі країни чи міжнародні космічні компанії починають співпрацювати задля спільної мети, на розвиток усього людства.

Сфера космічних досліджень займає відіграє вагому роль в розширенні нашого розуміння Всесвіту. Це величезне поле, що охоплює дослідження небесних тіл і явищ за межами земної атмосфери, має ключове значення для розгадки таємниць формування, еволюції нашої Сонячної системи та потенціалу життя за межами нашої планети. На передньому краї цього дослідження знаходяться дослідження, зосереджені на астероїдах і метеоритах, які є ключовими для розшифровки історії та складу нашої Сонячної системи.

Астероїди, скелясті залишки ранньої Сонячної системи, особливо важливі в цьому контексті. Ці об'єкти, розташовані переважно в поясі астероїдів між Марсом і Юпітером, пропонують безцінне розуміння первісних матеріалів, з яких склалися планети. Серед них астероїд 4 Веста виділяється своїми унікальними характеристиками та історією. Як одне з найбільших і наймасивніших тіл у поясі астероїдів, вважається, що Веста зазнала диференціації на ядро, мантію та кору, подібно до Землі. Таким чином, дослідження матеріалів, що походять з Вести, дає рідкісне уявлення

про процеси, які сформували планетарні тіла в Сонячній системі, що зароджується.

Метеорити, як і метеорит Юртук, походять з астероїда 4 Веста, є критично важливими для цієї галузі досліджень. Ці позаземні камені, які пережили подорож крізь земну атмосферу, є відчутними зразками далеких космічних тіл, що пропонує прямий спосіб вивчення матеріалів, з яких утворюються астероїди. Аналіз таких метеоритів дає змогу вченим усунути прогалини в знаннях про склад, вік та історію їхніх батьківських тіл, що інакше неможливо досягти лише за допомогою дистанційного зондування чи телескопічних спостережень..

Вивчення метеоритів, особливо тих, що походять від відомих небесних тіл, має величезне значення для планетології. Ця робота присвячена метеориту Юртук, об'єкта, що представляє значний інтерес у поясі астероїдів. Актуальність цього дослідження є різноманітною та перетинає кілька ключових областей метеоритики та планетознавства.

Астероїд Веста, друге за величиною тіло в поясі астероїдів, був предметом інтенсивних досліджень через його унікальну геологію та історію. Аналіз метеорита Юртук дає неоціненну можливість розширити наше розуміння складу та еволюційної історії Вести. Це особливо важливо, враховуючи, що місії прямого відбору зразків до Vesta є складними.

Такі метеорити, як Юртук, служать капсулами часу, несучи в собі інформацію про умови та процеси, що переважали на ранніх стадіях Сонячної системи. Вивчаючи її склад та ізотопні сигнатури, ми можемо отримати уявлення про сонячну туманність, з якої утворилися планети та інші тіла Сонячної системи.

Дослідження метеорита Юртук використовує передові аналітичні методи, включаючи рентгенівську дифракцію (XRD) і енергодисперсійну рентгенівську спектроскопію (EDS). Це не тільки допомагає розшифрувати характеристики метеорита, але й сприяє розвитку та вдосконаленню аналітичних методів дослідження метеоритів.

Дослідження метеорита Юртук також служить освітнім цілям, стимулюючи інтерес до космічної науки та досліджень. Він надає реальні приклади для академічного дискурсу та може надихати майбутні покоління вчених.

Інформація, отримана від метеорита Юртук, може стати основою для майбутніх космічних місій, особливо тих, які спрямовані на дослідження та експлуатацію астероїдів. Розуміння складу та структури таких органів має вирішальне значення для планування місії та використання ресурсів у космосі.

Як потенційно новий тип метеорита, отриманого з Вести, метеорит Юртук може зробити внесок у вдосконалення систем класифікації метеоритів. Це покращує наше загальне розуміння різноманітності метеоритів та їх походження.

Підсумовуючи, дослідження метеорита Юртук є не просто ізольованим науковим заходом, а значним внеском у ширшу галузь науки про планети. Його наслідки виходять далеко за межі досліджень метеоритів, пропонуючи зрозуміти саму структуру нашої Сонячної системи та процеси, які її сформували.

Постановка проблеми дослідження: Основна дослідницька проблема, яка розглядається в цьому дослідженні, включає всебічний аналіз метеорита Юртук, який походить з астероїда 4 Веста. Незважаючи на прогрес у космічних дослідженнях і дослідженнях метеоритів, залишається значна прогалина в нашому розумінні матеріалів, з яких складається Веста, особливо ті, які потрапили на Землю як метеорити. Ця прогалина обмежує наші знання про геологічну історію Вести і, як наслідок, наше розуміння ранньої Сонячної системи. Необхідність усунути цю прогалину за допомогою передових аналітичних методів для вивчення мінералогічного та хімічного складу метеорита Юртук становить суть проблеми дослідження.

Предмет дослідження: Предметом цього дослідження є сам метеорит Юртук. Дослідження зосереджено на його фізичних, хімічних і

мінералогічних властивостях, які мають вирішальне значення для розуміння його походження та історії.

Об'єкт дослідження: Об'єкт дослідження є ширшим, ніж сам метеорит, охоплюючи процеси та історію астероїда Веста 4, а також ранньої Сонячної системи. Вивчаючи метеорит Юртук, дослідження спрямоване на те, щоб отримати уявлення про процеси формування, еволюції та диференціації Вести.

Мета дослідження: Метою цього дослідження є всебічний і детальний аналіз метеорита Юртук з метою визначення його походження, історії та процесів, які він зазнав. Кінцева мета полягає в тому, щоб покращити наше розуміння астероїда Веста 4 і зробити внесок у ширшу сферу планетознавства, надаючи нове розуміння природи матеріалів у поясі астероїдів і їхнього значення для еволюції Сонячної системи.

Відповідно до мети визначено **основні завдання дослідження:**

- з наявних літературних джерел дослідити історію астероїда 4 Веста та метеориту Юртук;
- провести рентгенодифракційні дослідження метеориту Юртук, щоб визначити вміст мінералів, що дасть змогу зрозуміти умови та процеси на астероїді Веста 4;
- встановити елементний склад метеорита, зосередившись на мікроелементах, які можуть виявити його походження та історію;
- дослідити мікроструктуру та текстуру метеорита, які можуть вказувати на історію його формування, термічні події та ударний метаморфізм, що стався під час його викиду з Вести та входження в атмосферу Землі.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше проведено комплексний хімічний профіль метеорита Юртук за допомогою комбінації методів SEM та EDX. Це охоплює детальний аналіз як основних, так і мікроелементів, що пропонує нове уявлення про елементарне різноманіття та розподіл у метеоритах, отриманих з Вести.

2. Вперше ретельно досліджено мікро- та наноструктурні особливості метеорита Юртук, що у подальшому може вказувати на історію термічних подій і ударного метаморфізму метеорита, відкриваючи новий погляд на його геологічну подорож.

3. Удосконалено аналітичні протоколи дослідження метеоритів за допомогою методів SEM і EDX. Це включає вдосконалені методи візуалізації та точніші методи кількісного визначення елементів.

4. Удосконалено методіку інтерпретації даних XRD у метеоритичних дослідженнях, зокрема в дешифруванні складних мінералогічних складів і кристалічних структур. Це сприяє більш точному розумінню мінералогічного складу метеоритів.

Практичне значення дослідження: Дослідження, проведені на метеориті Юртук, що походить від астероїда 4 Веста, мають важливе практичне значення, впливаючи на різні аспекти метеоритики, планетознавства та більш широких наукових застосувань:

1. Методології, розроблені та вдосконалені під час цього дослідження, зокрема використання SEM, EDX та XRD, представляють значне розширення аналітичних можливостей дослідження метеоритів. Покращені протоколи та аналітичні стратегії можна застосувати до майбутніх досліджень інших метеоритів, допомагаючи в більш точному та комплексному аналізі.

2. Встановлюючи детальний профіль метеорита Юртук, це дослідження надає модель для розуміння зв'язків між астероїдами та їхніми відповідними метеоритами. Це особливо важливо для поточних і майбутніх космічних місій, націлених на астероїди, оскільки це дає еталон для порівняння зібраних зразків із метеоритами, знайденими на Землі.

3. Детальний аналіз метеорита Юртук сприяє нашому розумінню складу та структури небесних тіл, таких як астероїд Веста 4. Ця інформація життєво важлива для майбутніх місій з дослідження космосу, особливо для тих, які розглядають потенціал видобутку астероїдів для ресурсів. Розуміння

складу та структури астероїдів має вирішальне значення для оцінки їх потенціалу для видобутку ресурсів.

4. Результати цього дослідження можуть бути використані як освітні інструменти як для академічних, так і для громадських програм. Надаючи реальні приклади того, як вивчають метеорити та що вони можуть розповісти нам про Сонячну систему, це дослідження може викликати інтерес і розуміння космічної науки серед студентів і широкої громадськості.

5. Розуміння складу та траєкторії метеоритів, таких як Юртук, може сприяти розробці стратегій планетарного захисту. Знання властивостей матеріалу метеоритів допомагає моделювати сценарії потенційного удару та розробляти стратегії пом'якшення загроз зіткнення з астероїдом.

6. Це дослідження є прикладом інтеграції геології, хімії, фізики та астрономії, сприяючи міждисциплінарній співпраці. Висновки та методи цього дослідження можуть бути застосовані в різних сферах, заохочуючи міждисциплінарний підхід до вирішення складних наукових питань.

Таким чином, практичне значення цього дослідження виходить за межі академічної сфери, пропонуючи цінний внесок у галузі дослідження космосу, використання ресурсів, освітньої діяльності та захисту планети. Воно служить основою для майбутніх досліджень і застосувань для розуміння історії та складу небесних тіл у нашій Сонячній системі.

ВИСНОВКИ

Це дослідження забезпечило багатогранне вивчення метеорита Юртук, який походить з астероїда 4 Веста, з наміром розшифрувати його походження, історію та процеси, через які він зазнав.

1. З наявних літературних джерел було встановлено, що метеорит Юртук є уламком астероїда Веста, відокремленим внаслідок зіткнень або інших космічних подій. Астероїд 4 Веста є одним з найбільших об'єктів у поясі астероїдів і має унікальну геологічну історію.
2. Дослідження мікроструктури метеориту Юртук на трьох ділянках (поверхня, розкіл та фьюжн-кірка), проведені за допомогою SEM-аналізу показали значні відмінності, що може розкрити цінну інформацію про його історію та умови, які панували під час його формування та подорожі до Землі. Результати такого аналізу можуть показати:
 - На поверхні метеориту візуальні особливості свідчать про вплив космічного середовища та ударів під час його подорожі через космос.
 - Внутрішня структура метеориту, містить важливу інформацію про його внутрішній склад та історію.
 - Фьюжн-кірка метеориту була сформована під час входження метеориту в атмосферу Землі та відображає сліди термічного впливу та абляції. Аналіз фьюжн-кірки дає можливість вивчити зміни, які відбулися на метеориті під час його проходження через атмосферу, включно зі зміною мінералогічного складу та текстури.
 - Елементний склад метеорита, визначений за допомогою EDX показав переважність в складі Si, O, Al. Разом з тим було зафіксовано наявність Mg, Ti, W. Елементний склад є типовим для метеоритів HED.
3. Проведені рентгенодифракційні дослідження метеориту Юртук показали наявність мінералів крестобаліту (SiO_2), рутилу (TiO_2) та альфа-фази Al_2O_3 (корунду), що також підтверджує походження метеориту Юртук з астероїду 4 Веста

Таким чином, дослідження метеорита Юртук не тільки просвітили наше розуміння його батьківського тіла, 4 Веста, але й підкреслили складну історію об'єктів у поясі астероїдів. Отримані знання виходять за межі одного небесного тіла, збагачуючи наше розуміння процесів формування планет і динамічної історії Сонячної системи. Метеорит Юртук є свідченням мінливого середовища ранньої Сонячної системи та катаклізмів, які сформували характеристики метеоритів, знайдених на Землі сьогодні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bowell, E., Chapman, C. R., Gradie, J. C., Morrison, D., & Zellner, B. (1978). Taxonomy of asteroids. *Icarus*, 35(3), 313-335.
2. Barucci, M. A., Capria, M. T., Coradini, A., & Fulchignoni, M. (1987). Classification of asteroids using G-mode analysis. *Icarus*, 72(2), 304-324.
3. Popescu, M., Licandro, J., Carvano, J. M., Stoicescu, R., de León, J., Morate, D., ... & Cristescu, C. P. (2018). Taxonomic classification of asteroids based on MOVIS near-infrared colors. arXiv preprint arXiv:1807.00713.
4. Carvano, J. M., Hasselmann, P. H., Lazzaro, D., & Mothé-Diniz, T. (2010). SDSS-based taxonomic classification and orbital distribution of main belt asteroids. *Astronomy & Astrophysics*, 510, A43.
5. Tancredi, G. (2014). A criterion to classify asteroids and comets based on the orbital parameters. *Icarus*, 234, 66-80.
6. Milani, A., Cellino, A., Knežević, Z., Novaković, B., Spoto, F., & Paolicchi, P. (2014). Asteroid families classification: Exploiting very large datasets. *Icarus*, 239, 46-73.
7. Burbine, T. H. (2016). *Asteroids* (Vol. 17). Cambridge University Press.
8. Piazzi, G. (1802). Della scoperta del nuovo pianeta Cerere Ferdinanda, ottavo tra i primarij del nostro sistema solare. Nella stamperia reale.
9. Barnard, E. E. (1895). Micrometrical determinations of the diameters of the Minor Planets Ceres (1), Pallas (2), Juno (3), and Vesta (4), made with the filar micrometer of the 36-inch Equatorial of the Lick Observatory; and on the albedos of those planets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 56, p. 55, 56, 55.

10. Marsset, M., Brož, M., Vernazza, P., Drouard, A., Castillo-Rogez, J., Hanuš, J., ... & Yang, B. (2020). The violent collisional history of aqueously evolved (2) Pallas. *Nature Astronomy*, 4(6), 569-576.
11. Herschel, W. (1800). XIV. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the sun. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (90), 284-292.
12. Herschel, W. (2013). *The Scientific Papers of Sir William Herschel*. Cambridge University Press.
13. Carry, B., Dumas, C., Fulchignoni, M., Merline, W. J., Berthier, J., Hestroffer, D., ... & Tamblyn, P. (2007). Near-infrared mapping and physical properties of the dwarf-planet Ceres. arXiv preprint arXiv:0711.1152.
14. Rayman, M. D. (2022). Dawn at Ceres: The first exploration of the first dwarf planet discovered. *Acta Astronautica*, 194, 334-352.
15. Cunningham, C. J. (2016). *Studies of Pallas in the Early Nineteenth Century: Historical Studies in Asteroid Research*. Springer.
16. Marchi, S., McSween, H. Y., O'Brien, D. P., Schenk, P., De Sanctis, M. C., Gaskell, R., ... & Russell, C. T. (2012). The violent collisional history of asteroid 4 Vesta. *Science*, 336(6082), 690-694.
17. Bottke Jr, W. F., Durda, D. D., Nesvorný, D., Jedicke, R., Morbidelli, A., Vokrouhlický, D., & Levison, H. (2005). The fossilized size distribution of the main asteroid belt. *Icarus*, 175(1), 111-140.
18. Space, N. A. (1977). National Aeronautics and Space Administration. Retrieved from National Aeronautics and Space Administration: www.nasa.gov.
19. Cellino, A., Somma, R., Tommasi, L., Paolinetti, R., Muinonen, K., Virtanen, J., ... & Delbò, M. (2006). NERO: general concept of a near-earth object radiometric observatory. *Advances in Space Research*, 37(1), 153-160.

20. Cellino, A. (2003). The observation of near-Earth objects from the space at thermal IR wavelengths. *Memorie della Società Astronomica Italiana*, v. 74, p. 245 (2003), 74, 245.
21. Mason, B. (1960). The origin of meteorites. *Journal of Geophysical Research*, 65(9), 2965-2970.
22. Mittlefehldt, D. W. (2008). Meteorites—A brief tutorial. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 68(1), 571-590.
23. Wasson, J. T. (2012). *Meteorites: Classification and properties* (Vol. 10). Springer Science & Business Media.
24. Beech, M. (1988). Meteor astronomy: a mature science?. *Earth, Moon, and Planets*, 43(2), 187-194.
25. Krinov, E. L. (2013). *Principles of Meteoritics: International Series of Monographs on Earth Sciences* (Vol. 7). Elsevier.
26. McCoy, T. J., Beck, A. W., Prettyman, T. H., & Mittlefehldt, D. W. (2015). Asteroid (4) Vesta II: Exploring a geologically and geochemically complex world with the Dawn Mission. *Geochemistry*, 75(3), 273-285.
27. Zuber, M. T., McSween, H. Y., Binzel, R. P., Elkins-Tanton, L. T., Konopliv, A. S., Pieters, C. M., & Smith, D. E. (2011). Origin, internal structure and evolution of 4 Vesta. *Space science reviews*, 163, 77-93.
28. Russell, C. T., Capaccioni, F., Coradini, A., Christensen, U., De Sanctis, M. C., Feldman, W. C., ... & Zuber, M. T. (2006). Dawn discovery mission to Vesta and Ceres: Present status. *Advances in Space Research*, 38(9), 2043-2048.
29. Li, J. Y., Le Corre, L., Schröder, S. E., Reddy, V., Denevi, B. W., Buratti, B. J., ... & Raymond, C. A. (2013). Global photometric properties of asteroid (4) Vesta observed with Dawn framing camera. *Icarus*, 226(2), 1252-1274.

30. Cruikshank, D. P., Tholen, D. J., Hartmann, W. K., Bell, J. F., & Brown, R. H. (1991). Three basaltic Earth-approaching asteroids and the source of the basaltic meteorites. *Icarus*, *89*(1), 1-13.
31. Zambon, F., De Sanctis, M. C., Schröder, S., Tosi, F., Longobardo, A., Ammannito, E., ... & Raymond, C. A. (2014). Spectral analysis of the bright materials on the asteroid Vesta. *Icarus*, *240*, 73-85.
32. Hardersen, P. S., Reddy, V., Roberts, R., & Mainzer, A. (2014). More chips off of Asteroid (4) Vesta: Characterization of eight Vestoids and their HED meteorite analogs. *Icarus*, *242*, 269-282.
33. Reddy, V., Li, J. Y., Le Corre, L., Scully, J. E., Gaskell, R., Russell, C. T., ... & McFadden, L. A. (2013). Comparing dawn, hubble space telescope, and ground-based interpretations of (4) Vesta. *Icarus*, *226*(1), 1103-1114.
34. Cunningham, C. J. (2017). Investigating the Origin of the Asteroids and Early Findings on Vesta. *Investigating the Origin of the Asteroids and Early Findings on Vesta*, ISBN 978-3-319-58117-0. Springer International Publishing AG, 2017.
35. Russell, C. T., Raymond, C. A., Jaumann, R., McSween, H. Y., De Sanctis, M. C., Nathues, A., ... & Joy, S. P. (2013). Dawn completes its mission at 4 Vesta. *Meteoritics & Planetary Science*, *48*(11), 2076-2089.
36. Reddy, V., Sanchez, J. A., Nathues, A., Moskovitz, N. A., Li, J. Y., Cloutis, E. A., ... & Schade, U. (2012). Photometric, spectral phase and temperature effects on 4 Vesta and HED meteorites: Implications for the Dawn mission. *Icarus*, *217*(1), 153-168.
37. Tricarico, P., & Sykes, M. V. (2010). The dynamical environment of Dawn at Vesta. *Planetary and Space Science*, *58*(12), 1516-1525.
38. Kochemasov, G. G. (2015, October). Highest volcanoes on terrestrial planets and dwarf-planets adorn the deepest depressions of their respective bodies. In *European Planetary Science Congress* (pp. EPSC2015-71).

39. Mittlefehldt, D. W. (2015). Asteroid (4) Vesta: I. The howardite-eucrite-diogenite (HED) clan of meteorites. *Geochemistry*, 75(2), 155-183.
40. Jourdan, F., Kennedy, T., Foreman, L., Mayers, C., Eroglu, E., & Yamaguchi, A. (2023). A slowly cooled deep crust on asteroid 4 Vesta and the recent impact history of rubble pile vestoids recorded by diogenites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
41. Buratti, B. J., Dalba, P. A., Hicks, M. D., Reddy, V., Sykes, M. V., McCord, T. B., ... & Russell, C. (2013). Vesta, vestoids, and the HED meteorites: Interconnections and differences based on Dawn Framing Camera observations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(10), 1991-2003.
42. Unsalan, O., Jenniskens, P., Yin, Q. Z., Kaygisiz, E., Albers, J., Clark, D. L., ... & Sariçiçek Meteorite Consortium). (2019). The Sariçiçek howardite fall in Turkey: Source crater of HED meteorites on Vesta and impact risk of Vestoids. *Meteoritics & Planetary Science*, 54(5), 953-1008.
43. Mittlefehldt, D. W. (2015). Asteroid (4) Vesta: I. The howardite-eucrite-diogenite (HED) clan of meteorites. *Geochemistry*, 75(2), 155-183.
44. Kumler, B., & Day, J. M. (2021). Trace element variations generated by magmatic and post-crystallization processes in eucrite meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 301, 211-229.
45. Zhu, K., Sossi, P. A., Siebert, J., & Moynier, F. (2019). Tracking the volatile and magmatic history of Vesta from chromium stable isotope variations in eucrite and diogenite meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 266, 598-610.
46. McSween Jr, H. Y., Raymond, C. A., Stolper, E. M., Mittlefehldt, D. W., Baker, M. B., Lunning, N. G., ... & Hahn, T. M. (2019). Differentiation and magmatic history of Vesta: Constraints from HED meteorites and Dawn spacecraft data. *Geochemistry*, 79(4), 1255-1266.

47. M.D. Foster, O.D. Friedrichs, R.G. Bell, F.A.A. Paz, and J. Klinowski. Chemical evaluation of hypothetical uninodal zeolites. *Journal of the American Chemical Society*, 126:9769–9775, 2004.
48. Zainuri, M. (2015). Synthesis of SiO₂ nanopowders containing quartz and cristobalite phases from silica sands. *Materials Science-Poland*, 33(1), 47-55.
49. He, J., Du, Y., Bai, Y., An, J., Cai, X., Chen, Y., Wang, P., Yang, X., & Feng, Q. (2019). Facile Formation of Anatase/Rutile TiO₂ Nanocomposites with Enhanced Photocatalytic Activity. *Molecules*, 24.
50. Chen, H., Chen, G., Wu, Y., Peng, J., Srinivasakannan, C., & Chen, J. (2017). Synthesis of Rutile TiO₂ from Panzhihua Sulfate Titanium Slag by Microwave Heating. *JOM*, 69, 2660-2665.
51. Al-Mushaki, M.A., Al-Ariki, S.A., & Alnehia, A. (2023). Effect of copper oxide (CuO) and vanadium oxide (V₂O₅) addition on the structural, optical and electrical properties of corundum (α -Al₂O₃). *Scientific Reports*, 13.
52. Imashuku, S., Fukumoto, M., Nakajima, K., & Suzuki, S. (2022). Characterization of α -Al₂O₃ in Structural Isomers of Alumina Formed by Oxidation of Fe–Cr–Al Alloys. *ISIJ International*.