

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЛОКАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавр за освітньою
програмою «Прикладна фізика»,
спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Локальні методи досліджень: Методичні вказівки до практичних занять [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спец. 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: А. В. Гільчук. – Електронні текстові дані (1 файл: 4.86 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 32 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 4 від 10.12.2020 р.)
за поданням Вченої ради Фізико-технічного інституту (протокол №9/2020 від 26.10.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ЛОКАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Укладачі: *Гільчук Андрій Володимирович*, канд. фіз.-мат. наук

Відповідальний редактор *Смирнов Сергій Анатолійович*, канд. фіз.-мат. наук, доцент

Рецензент *Бачеріков Ю.Ю.*, доктор.фіз.-мат.наук, провідний наук. співр. відділу фізики оптоелектронних приладів Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАНУ

Методичні вказівки до курсу «Локальні методи досліджень» призначено для студентів, які навчаються за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали». Навчальний посібник містить в собі вказівки для проведення розрахунків взаємодії електронного пучка з поверхнею твердого тіла в програмному пакеті CASINO, вказівки для проведення симуляцій поширених методик аналізу властивостей твердого тіла на платформі MyScore, а також вказівки для статистичної обробки мікрофотографій зразків високодисперсних матеріалів в програмному пакеті Image Pro Plus.

Зміст

1. Моделювання взаємодії електронного пучка з поверхнею твердого тіла	4
1.1. Програмне забезпечення CASINO	4
1.2. Моделювання методом Монте-Карло взаємодії електронного променя в CASINO	5
1.2.1. Траєкторії електронів та товщина проникнення в зразок	6
1.2.2. Енергія зворотньо розсіяних електронів (BE)	8
1.2.3. Радіальний розподіл зворотньо розсіяних електронів (BE)	9
1.2.4. Кути зворотньо розсіяних електронів (BE)	10
1.2.5. Ізолінії енергій	11
1.2.6. Рентгенівське випромінювання (X-Ray)	12
2. Імітація роботи з обладнанням для аналізу властивостей твердих тіл	14
2.1. Скануюча електронна мікроскопія	14
2.2. Рентгенівська спектроскопія з дисперсією за енергіями	17
2.3. Трансмісійна електронна мікроскопія	19
3. Аналіз дисперсності порошкових матеріалів	26
Список використаних джерел	32

1. МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА З ПОВЕРХНЕЮ ТВЕРДОГО ТІЛА

1.1. Програмне забезпечення CASINO

CASINO - це програма, в якій відбувається моделювання траєкторії електронів у твердому тілі використовуючи метод Монте-Карло, спеціально розроблена для взаємодії з електронним пучком як в об'ємній, так і в тонкій фользі.

Метод Монте-Карло, що лежить в основі програмного забезпечення, використовує випадкові числа і імовірнісні розподіли для моделювання фізичних взаємодій між електронами і зразком. Траєкторії електронів представлені окремими подіями пружного розсіювання, в той час як непружні події апроксимуються моделлю середньої втрати енергії між двома подіями пружного розсіювання. Остаточний розрахунок кожної траєкторії електронів можна описати наступними кроками. По-перше, початкове положення і енергія електрона розраховуються на основі параметрів, зазначених користувачем. З цього вихідного положення електрон буде падати на зразок. Відстань між двома зіткненнями виходить на основі поперечного перерізу пружного розсіювання, в якому випадкове число використовується для розподілу відстані після розподілу ймовірностей. Кут пружного розсіювання визначається з іншого випадкового числа з використанням розрахованого диференціального перерізу або просто з використанням стандартизованих табличних значень. Коли електрон перетинає трикутник (який використовується для опису зразка), сегмент закінчується на кордоні, і новий сегмент генерується випадковим чином з властивостей нової області. Переміщення електрону вважається марківським процесом – це означає, що минулі події не впливають на майбутні події. Потім ці кроки повторюються до тих пір, поки електрон не покине зразок або не опиниться в пастці всередині зразка.

Якщо моделюються вторинні електрони, в якості порогового значення використовується роота виходу області. CASINO може відстежувати координати, коли відбувається зміна області під час моделювання траєкторії електрона. Швидкі вторинні електрони використовують рівняння Моллера, в той час як повільні вторинні електрони генеруються з теорії плазмону. Робота виходу і енергії плазмону є двома параметрами, необхідними для генерації вторинних електронів в області. CASINO автоматично вводить ці параметри для вибраного елемента, але користувач може змінити ці значення в разі потреби.

Програма CASINO дозволяє користувачеві вибрати кілька різних властивостей мікроскопа, який буде використовуватися в симуляції. Крім того, властивості моделювання можуть бути змінені. Оскільки багато властивостей мікроскопа можуть сильно впливати на час моделювання або обсяг пам'яті комп'ютера, необхідний для виконання моделювання, програма дозволяє використовувати декілька ядер для більш швидкого і менш жорсткого виконання моделювання в пам'яті комп'ютера. Якщо хтось хоче зробити моделювання швидше або менш жорстким для пам'яті комп'ютера, багато властивостей можуть бути деактивовані, щоб забезпечити більш швидке моделювання.

1.2. Моделювання методом Монте-Карло взаємодії електронного променя в CASINO

В якості зразку виберемо сульфат заліза $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Задамо товщину 50 нм. Всі дослідження будуть відбуватися при прискорюючих напругах: $U = 0.5, 1, 1.5$ кеВ.

1.2.1. Траєкторії електронів та товщина проникнення в зразок.

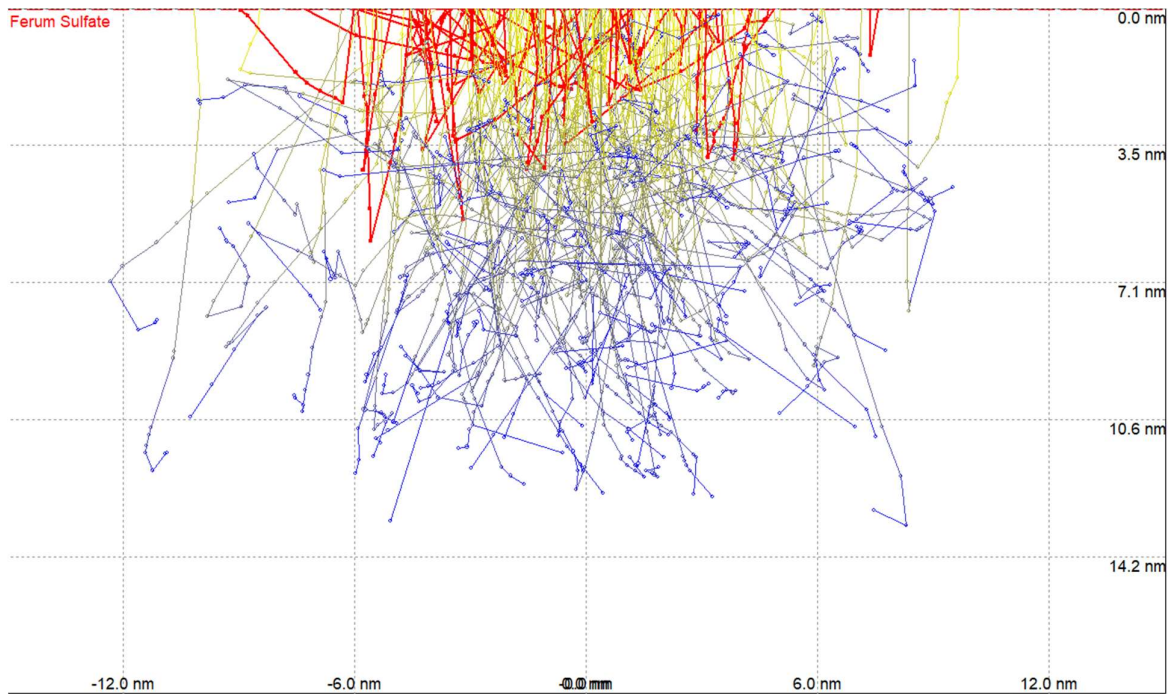


Рис 1(а). Траєкторія електронів та товщина проникнення при $U = 0.5$ кеВ.

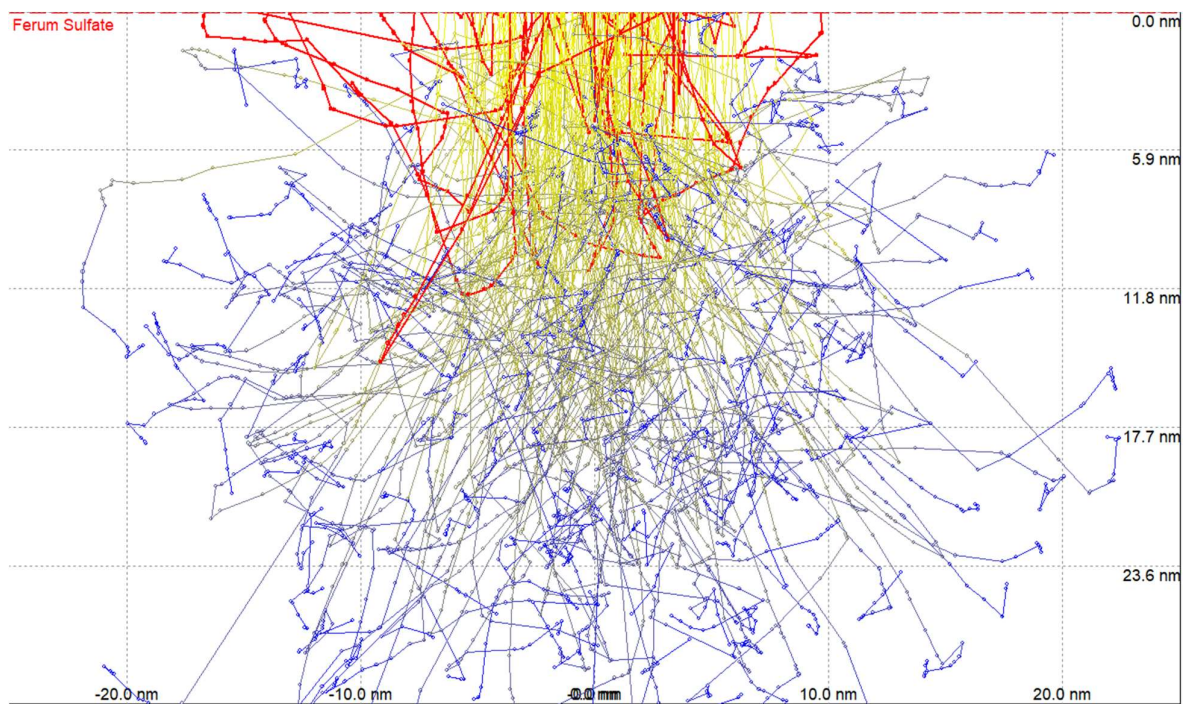


Рис 1(б). Траєкторія електронів та товщина проникнення при $U = 1$ кеВ.

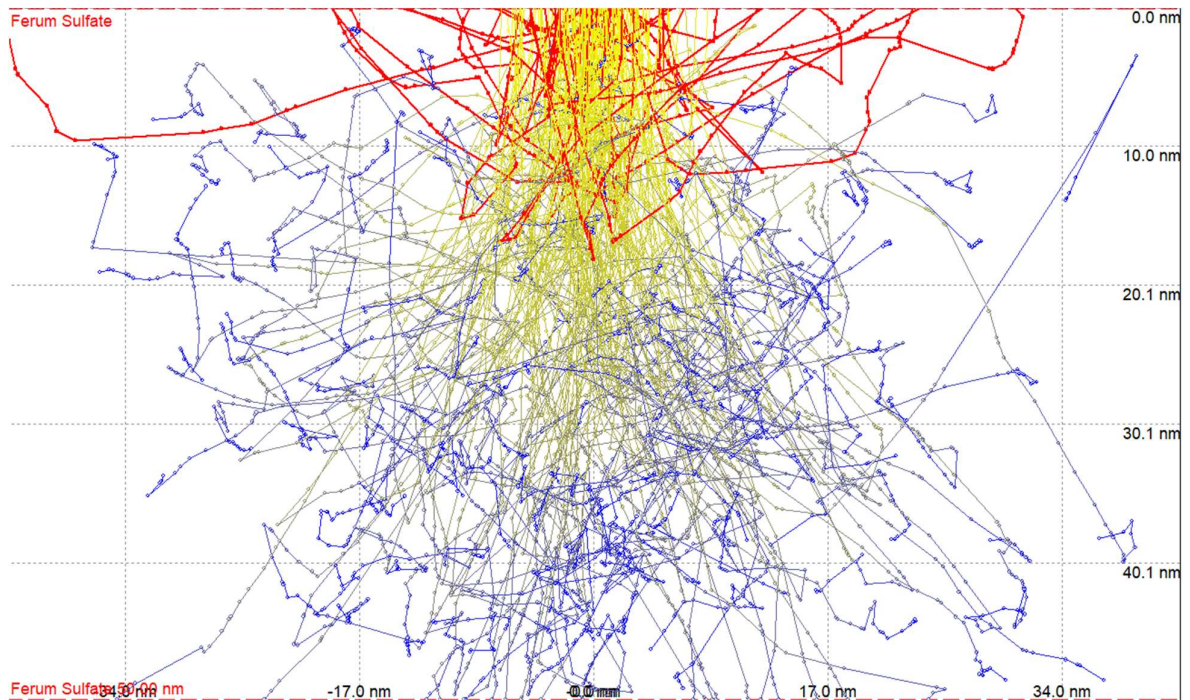


Рис 1(с). Траекторія електронів та товщина проникнення при $U = 1.5$ кеВ.

Аналіз розрахунків показує, що в залежності від прискорюючої напруги, отримуємо різні значення глибини розсіяних електронів. При $U = 0,5$ кеВ максимальна глибина розсіяних електронів становить 14 нм, що свідчить про невисоку глибину проникнення в зразок. При $U = 1$ кеВ електрони можна спостерігати на глибині до 30 нм, що в 2 рази перевищує значення при $U = 0.5$ кеВ. При $U = 10$ кеВ було отримано максимальну глибину 50нм.

Якщо розглядати глибину виходу первинних електронів, отримані наступні дані: при $U = 0.5$ кеВ – 5 нм, при $U = 1$ кеВ – близько 12 нм, при $U = 1.5$ кеВ – 18 нм.

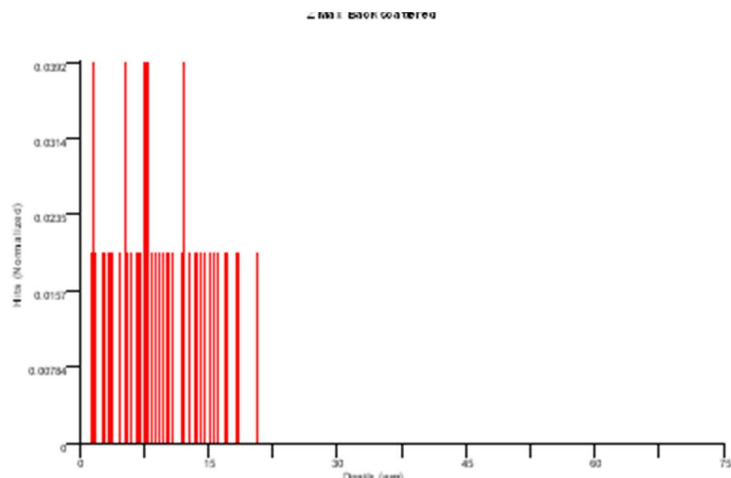


Рис 2. Щільність розподілу кількості зсувів траєкторій в залежності від глибини проникнення в зразок при $U = 1.5$ кеВ.

1.2.2. Енергія зворотно розсіяних електронів (ВЕ).

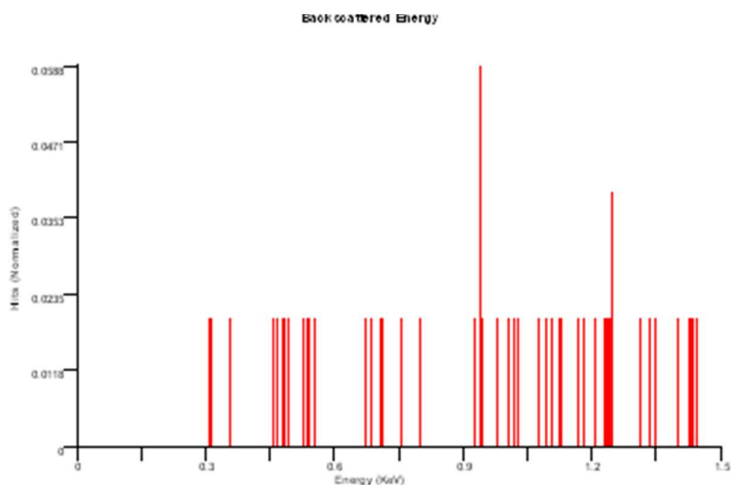


Рис 3. Щільність розподілу кількості зсувів траєкторій в залежності від енергії електронних траєкторій при $U = 1.5$ кеВ.

1.2.3. Радіальне положення зворотно розсіяних електронів (ВЕ).

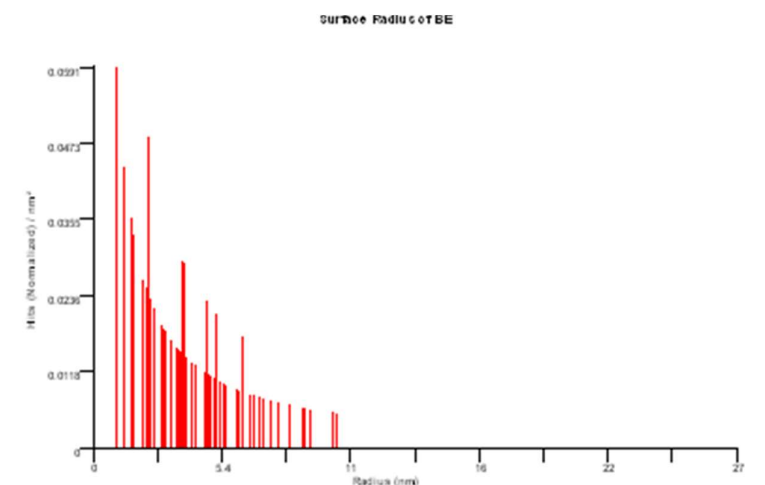


Рис 3(а). Розподіл кількості електронів на 1nm^2 в залежності від радіального положення ВЕ електронів, розрахованого від точки падіння первинного пучка на зразок при $U = 0.5\text{keV}$.

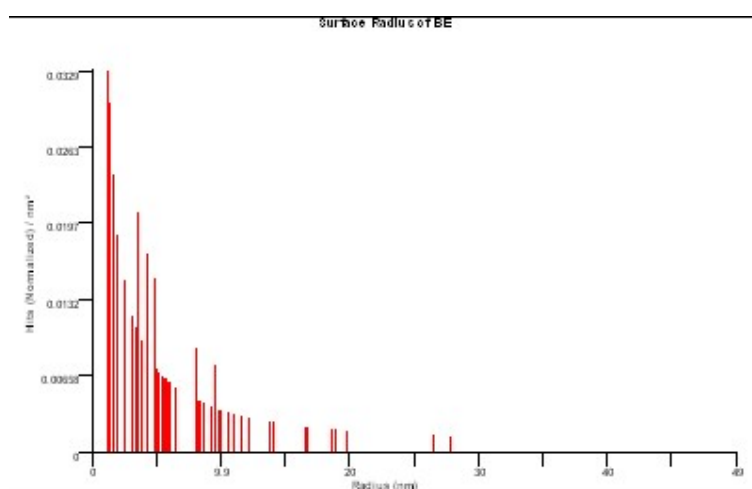


Рис 3(б). Розподіл кількості електронів на 1nm^2 в залежності від радіального положення ВЕ електронів, розрахованого від точки падіння первинного пучка на зразок при $U = 1\text{keV}$.

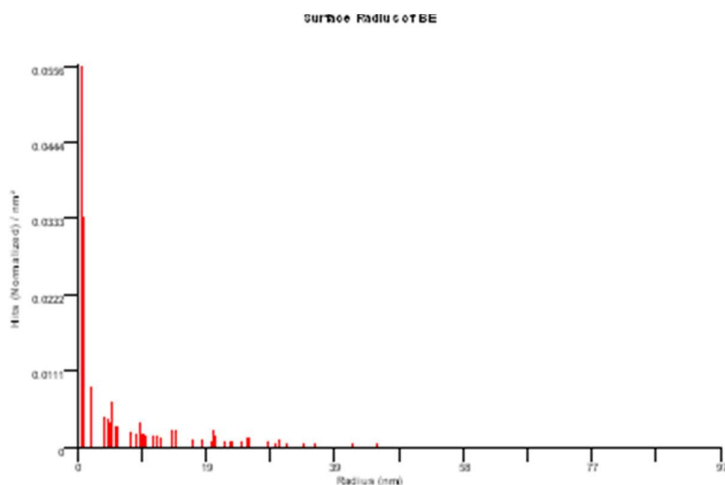


Рис 3(с). Розподіл кількості електронів на 1 nm^2 в залежності від радіального положення ВЕ електронів, розрахованого від точки падіння первинного пучка на зразок при $U = 1.5\text{ keV}$.

Виходячи з аналізу розподілів, відображених на рис 3(а) - рис 3(с), впливає висновок про те, що зі збільшенням прискорюючої напруги радіальне положення ВЕ електронів теж зростає, при цьому можна побачити, що зменшується щільність електронів. Отже, збільшення прискореної напруги призводить збільшення площі опромінюваної поверхні та зменшенню щільності траекторій на одиницю прощі взаємодії.

1.2.4. Кути зворотно розсіяних електронів (ВЕ).

Аналіз розрахованих залежностей кутів зворотно розсіювальних електронів від прискорюючої напруги показав, що із збільшенням прискорюючої напруги відбувається зміщення діапазонів кутів. Так для $U = 1\text{ keV}$ цей діапазон становить $0-86^\circ$, $U = 5\text{ keV}$ $10-82^\circ$, $U = 10\text{ keV}$ $10-88^\circ$.

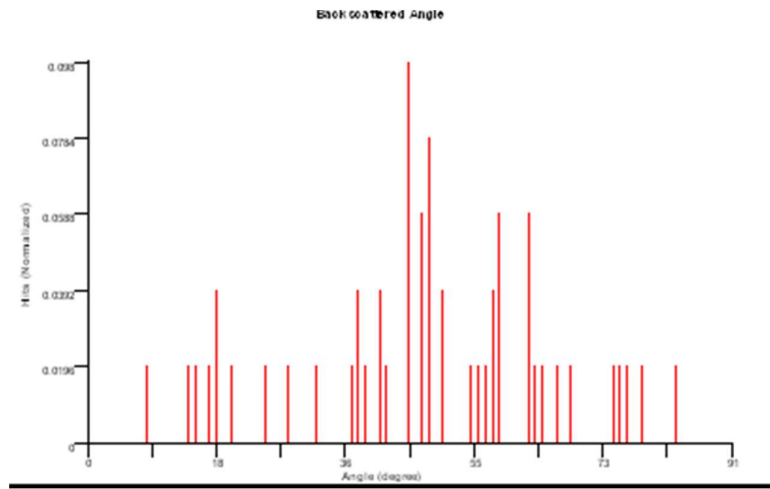


Рис 4. Розподіл кількості траєкторій в на в залежності від кутів зворотно розсіюваних електронів при $U = 1.5$ кеВ.

1.2.5. Ізолінії енергій.

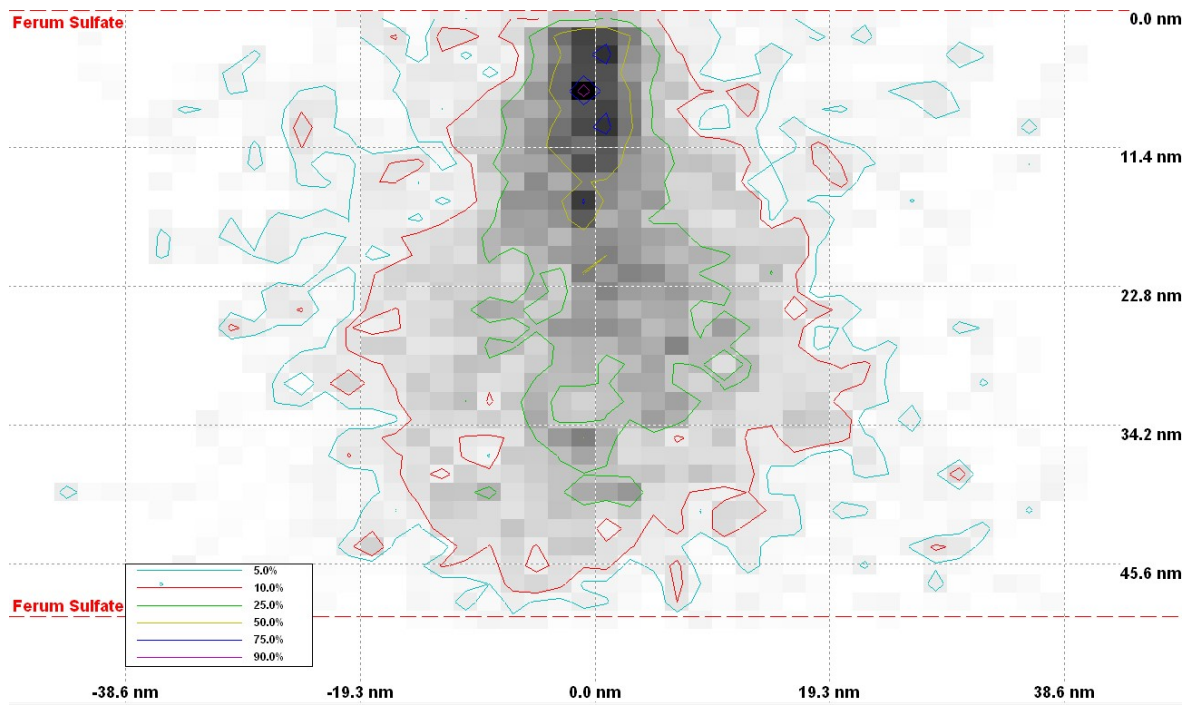


Рис 5. Вид поперечного перерізу поглиненої енергії в зразку, що показує контур енергетичних ліній при напрузі прискорення 1.5 кеВ.

Сірі та темно сірі області характеризують області максимально поглиненої енергії. Чим темніша область – тим більше енергії поглинається. І як можна бачити - ця область припадає на ту частину пучка електронів, що містить 90% першопочаткової енергії.

Рис 5. демонструє взаємозв'язок енергії і прискорюючої напруги, завдяки якому енергія електронного пучка може розсіюватися в матеріалі. Також слід сказати, що даний розподіл має грушоподібний вигляд.

1.2.6. Рентгенівське випромінювання (X-Ray).

Аналіз показав, що рентгенівське випромінювання не вдалося отримати при $U = 0.5\text{кеВ}$. Очевидно, що ця напруга виявилася малою для того, щоб його отримати. В інших випадках, що відповідають напругам $U = 1\text{кеВ}$ та $U = 1.5\text{кеВ}$ - отримано.

При $U = 1\text{кеВ}$ та $U = 1.5\text{кеВ}$ інтенсивність рентгенівського випромінювання має схожий характер, а саме: з підвищенням напруги спостерігається підвищення генерації рентгенівського випромінювання.

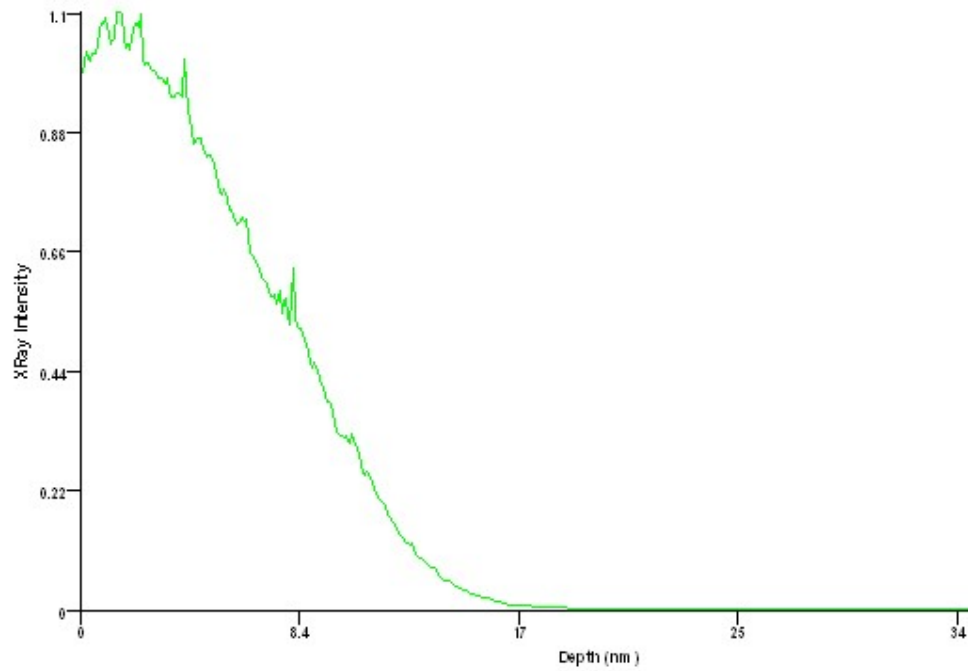


Рис 7. Інтенсивність рентгенівського випромінювання в залежності від глибини проникнення електронів для прискореної напрузі 1 кеВ.

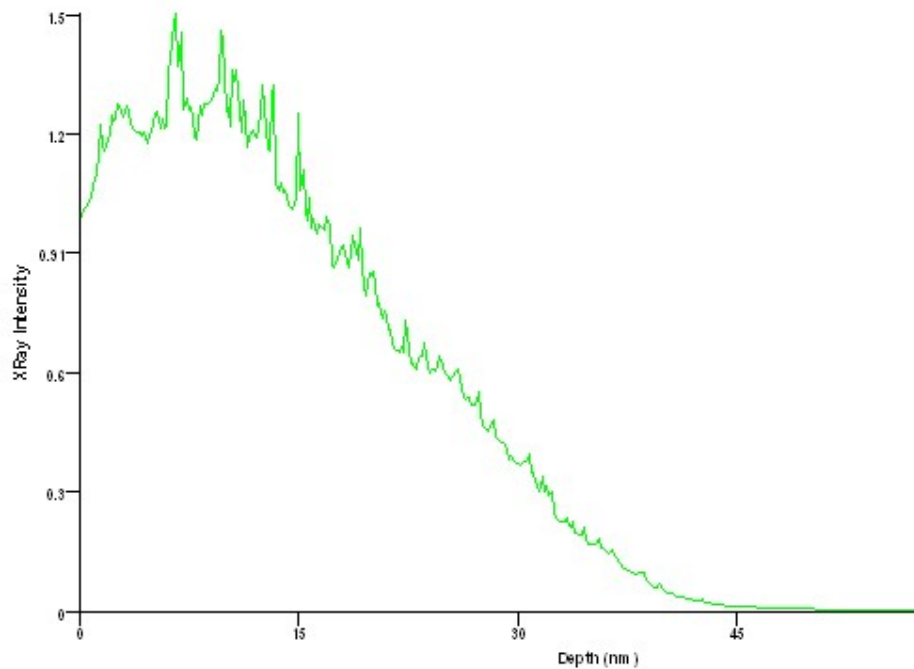


Рис 8. Інтенсивність рентгенівського випромінювання в залежності від глибини проникнення електронів для прискореної напрузі 1.5 кеВ.

2. ІМІТАЦІЯ РОБОТИ З ОБЛАДНАННЯМ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТВЕРДИХ ТІЛ

2.1. Скануюча електронна мікроскопія

Скануючий електронний мікроскоп (SEM) використовує сфокусований промінь електронів для створення збільшеного зображення зразка. Електронний промінь сканується регулярним малюнком по всій поверхні зразка, а електрони, що виходять із зразка, використовуються для створення зображення. SEM - це інструмент для створення зображень. SEM можуть збільшувати об'єкт приблизно від 10 до 300 000 разів. Шкала масштабу зазвичай надається на зображенні SEM. Шкала використовується для обчислення розмірів особливостей зображення. Сканувальні мікроскопи застосовуються в першу чергу як дослідницький інструмент у фізиці, матеріалознавстві, електроніці, біології, нанотехнологіях. В основному для отримання зображення досліджуваного зразка, яке може сильно змінюватись залежно від типу детектора, який використовується. Ці відмінності одержаних зображень дозволяють робити висновки про фізичні властивості поверхні, проводити дослідження рельєфу поверхні. Електронний мікроскоп практично єдиний прилад, який може дати зображення поверхні сучасної мікросхеми або проміжної стадії процесу фотолітографії.

Дослідимо за допомогою емулятора MyScore зразки дерева та сталі.

Потрібно підготувати камеру мікроскопа за наступними пунктами:

- 1) Впустити повітря у камеру зразка.
- 2) Відкрити камеру та поставити зразок.
- 3) Закрити камеру.
- 4) Відкачати повітря з камери.
- 5) Встановити потрібну напругу.
- 6) Увімкнути електронний промінь (Рис.9).



Рис.9 Підготовка камери

Після підготовки зразка та камери, необхідно налаштувати параметри мікроскопа, які впливають на якість зображення, такі як яскравість і контраст. Було вибрано наступні налаштування для сталі (Рис.10):

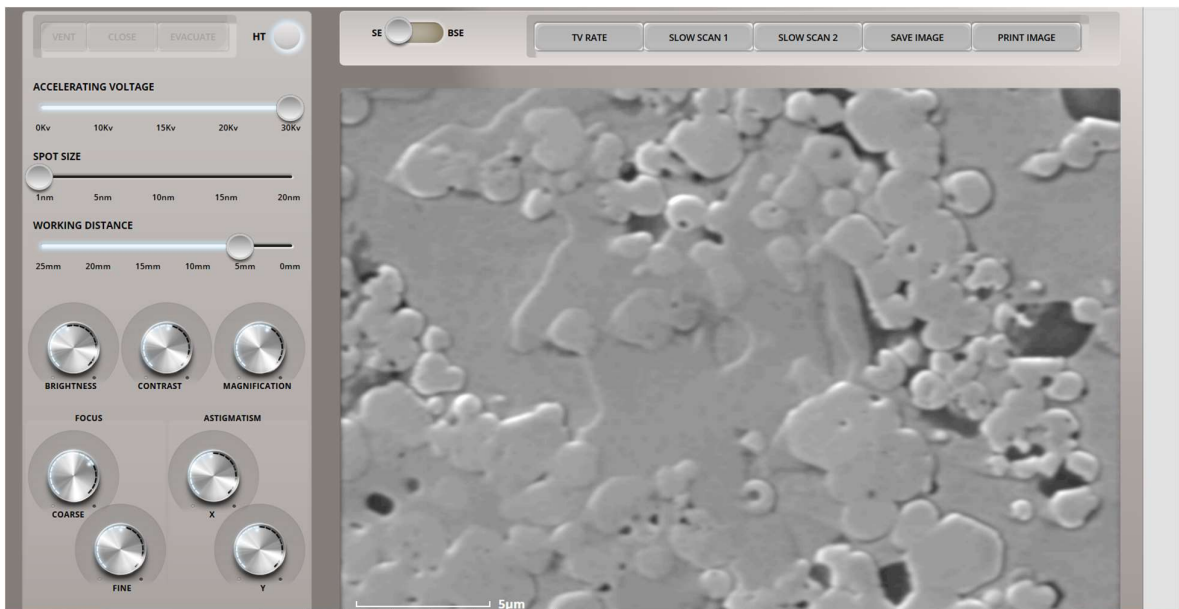


Рис.10 Налаштування зображення для сталі

Отримаємо електронно-мікроскопічне зображення для сталі (Рис. 11):

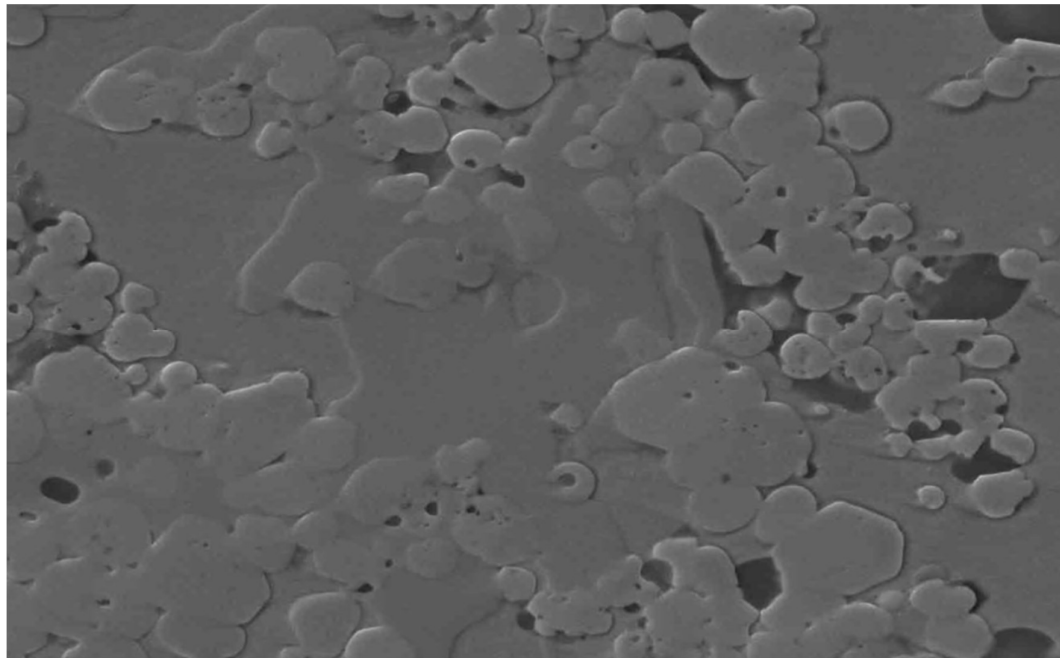


Рис. 11 Електронно-мікроскопічне зображення для сталі

Налаштування та результати для дерева зображені на Рис. 12-13



Рис. 12 Налаштування зображення для дерева

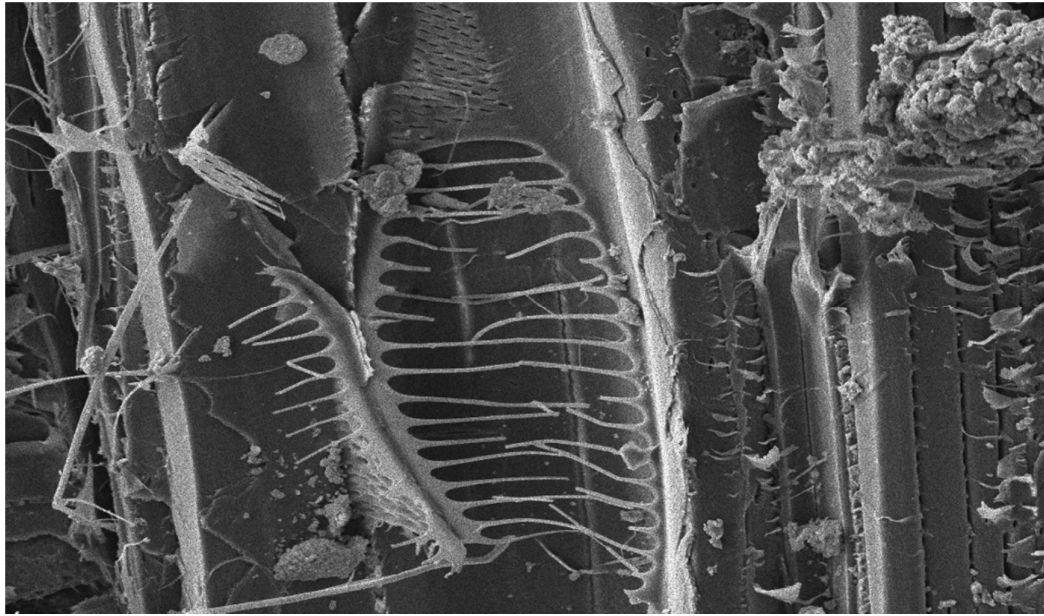


Рис.13 Електронно-мікроскопічне зображення для дерева

Цей метод дозволяє отримати чіткі чорно-білі зображення матеріалів. Даний спосіб використовується у багатьох галузях. Наприклад, в літакобудуванні (виявлення мікро пошкоджень матеріалів), будівництві, науці тощо.

2.2. Рентгенівська спектроскопія з дисперсією за енергіями

Метод енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії – аналітичний метод елементного аналізу, заснований на аналізі енергетичних ефектів рентгеновського спектру матеріалів, варіант рентгеноспектрального аналізу. В данному методі, енергія непружно розсіяного електрона переводить атом у збуджений стан, я якого атом через деякий час релаксує знову в свій стаціонарний стан і при цьому випромінюється квант рентгенівського випромінювання. Досліджуючи енергетичний спектр такого випромінювання, можна одержати інформацію про якісний та кількісний елементний склад зразка. Цей метод може використовуватись для дослідження вмісту домішків у різних матеріалах, дослідження діаграм стану сплавів тощо.

Проведемо дослідження на прикладі зразка магматичної породи, що складається з переважно силікатних мінералів, з оксидними та сульфідними мінералами. Виберемо Режим «Площа», щоб визначити області, що представляють інтерес для аналізу.

1) Досліджуємо, які елементи знаходяться у вибраній області матеріалу (Рис.14).

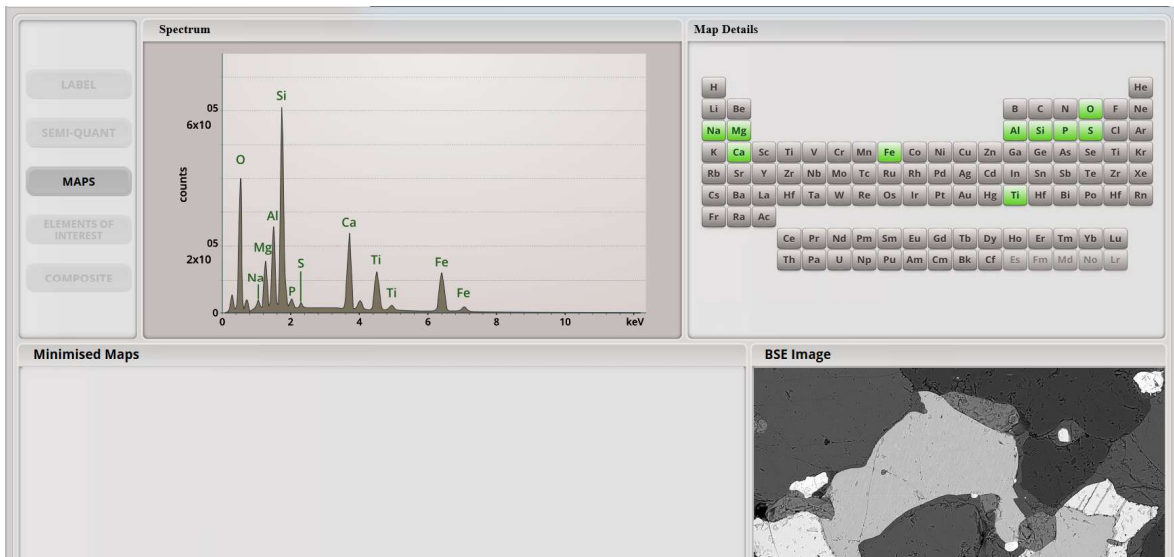


Рис.14 Якісний елементний склад зразка

2) Знаходимо в якій області зразка знаходяться конкретні елементи (Рис. 15).

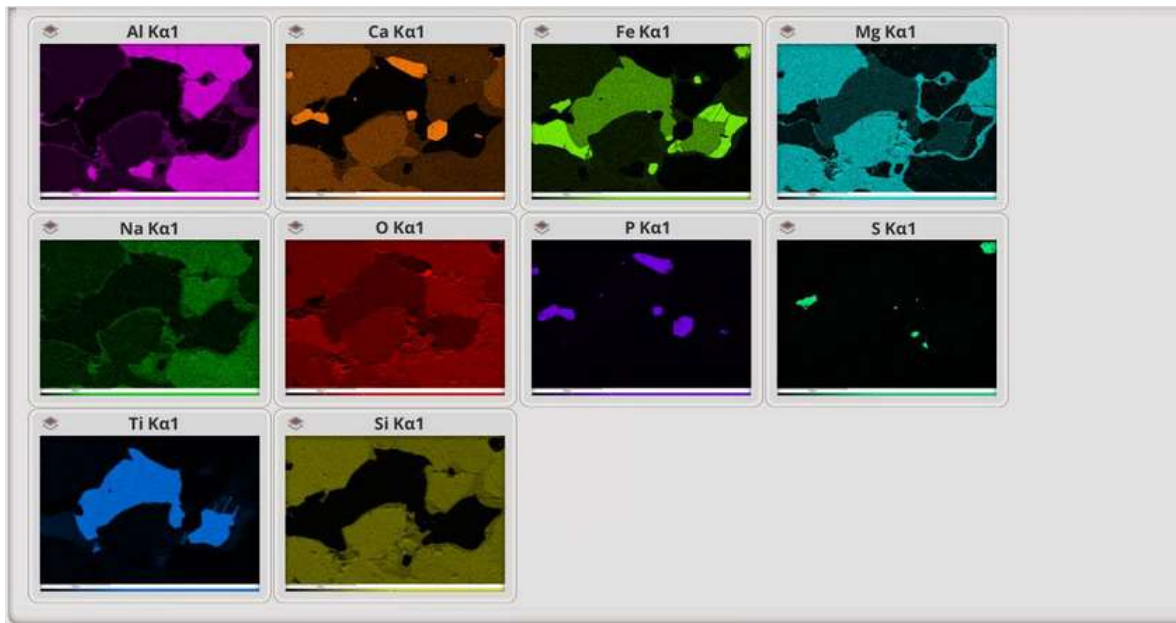


Рис. 15 Карти розподілів хімічний елементів всередині зразка

Знаходимо фінальний розподіл хімічних елементів всередині зразка (Рис.16).

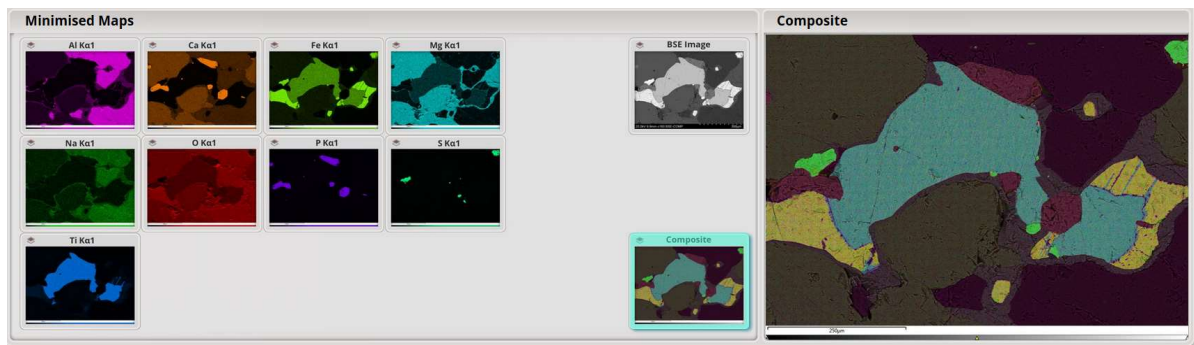


Рис.16 Розподіл хімічних елементів всередині зразка

ELEMENT	Wt%	Wt% SIGMA	ATOMIC %
O	30.64	0.32	57.76
Mg	2.84	0.08	3.53
Ti	31.23	0.20	19.66
Fe	35.28	0.24	19.05
Total:	100.00		100.00

Рис. 17 Приклад кількісного елементного аналізу

2.3. Трансмісійна електронна мікроскопія

Трансмісійний електронний мікроскоп (ТЕМ) – це аналітичний інструмент, що дозволяє візуалізувати та проаналізувати зразки в масштабах мікропростору ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$) та нанопростору ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$). ТЕМ виявляє особливості мікроструктури, недосяжні для світлової мікроскопії, оскільки в ТЕМ використовується сфокусований промінь електронів високої енергії. Це дозволяє детально вивчити мікроструктуру за допомогою зображень високої роздільної здатності та з великим збільшенням. Це також дозволяє досліджувати кристалічні структури, орієнтації зразків та хімічні склади фаз, осадів та забруднень за допомогою дифракційного аналізу, рентгенівського та електронно-енергетичного аналізу. Трансмісійна електронна мікроскопія використовується для отримання зображень із зразка шляхом освітлення зразка електронами (тобто пучком електронів) у високому вакуумі та

детектування електронів, які проходять через зразок. Зрештою, за допомогою ТЕМ ми можемо побачити атомів, присутні в кристалічних зразках. По суті, ТЕМ створює звичайне зображення (зазвичай його називають світлопольним зображенням) зразка. Уявіть, що промінь факела сяє через ґрати на вікні. Світло проходить через прозорі частини вікна, але зупиняється ґратами. На стіні позаду ми бачимо решітки ґрат як тіні. ТЕМ використовує пучок високоенергетичних електронів замість світла від факела. При проходженні через зразок деякі області матеріалу гальмують або відхиляють електрони більше, ніж інші області. Електрони детектують знизу зразка на фосфоресцентний екран або через камеру. В областях, де електрони не проходять через зразок, зображення темне. Там, де електрони не розмиті, зображення яскравіше, а між ними є діапазон сірого кольору, залежно від способу взаємодії електронів та їх розсіювання на зразку. Типовий електронний мікроскоп містить такі компоненти:

- Електронна гармата
- Електронний пучок
- Електромагнітна система лінз
- Детектори
- Система охолодження
- Камера для зразка
- Основна панель управління
- Формування зображення

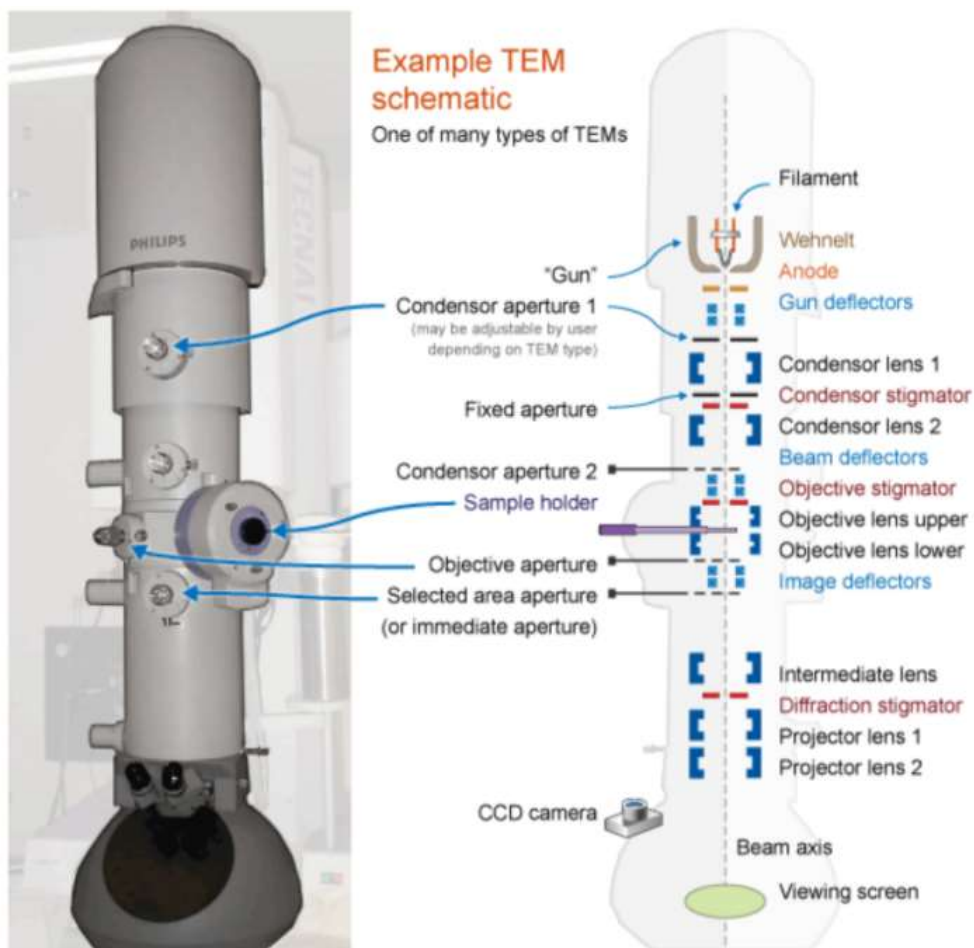


Рис.18 Схема внутрішньої будови трансмісійного електронного мікроскопа на прикладі сучасного приладу.

Покажемо послідовність дій оператора трансмісійного електронного мікроскопа в емуляторі MyScore.

1. Тримач зразка вставляється в колону. Під час цього зразок пропускають через шлюз (оскільки колону мікроскопа знаходиться під високим вакуумом). Важливо зберігати ущільнювальне кільце на тримачі без ворсу та пилу, змащене маслом. Після закінчення відкачування шлюзу тримач зразка можна повністю вставити. У багатьох мікроскопах це передбачає обертання тримача зразка і ретельне його позиціонування.



Рис. 19 Процес ввімкнення

2. Виставляємо прискорюючу напругу: це визначає швидкість і довжину хвилі електронів. Вибір прискорюючої напруги диктується характером зразка. Аналіз більшості біологічних зразків здійснюється при низьких прискорювальних напругах, наприклад 80 кВ або 120 кВ, щоб отримати відповідний контраст від біологічних структур, що містять легкі елементи. Більш високі прискорювальні напруги, напр. 200 кВ, як правило, використовуються для аналізу неорганічних зразків.

3. Виставимо високу напругу

4. Увімкнемо струм нитки. Струм нитки регулює температуру нитки і, отже, кількість емітованих електронів і, як наслідок, "струм пучка". Струм нитки збільшується до тих пір, поки струм пучка не перестане зростати. Насичення – це умова, коли електронна гармата забезпечує максимальну кількість електронів (струм пучка) для заданої геометрії.

5. Вибір розміру плями. Регулятор розміру плями регулює першу лінзу конденсатора, а в поєднанні з другою лінзою конденсатора вони знеструмлюють віртуальне джерело для надання певного «розміру плями».

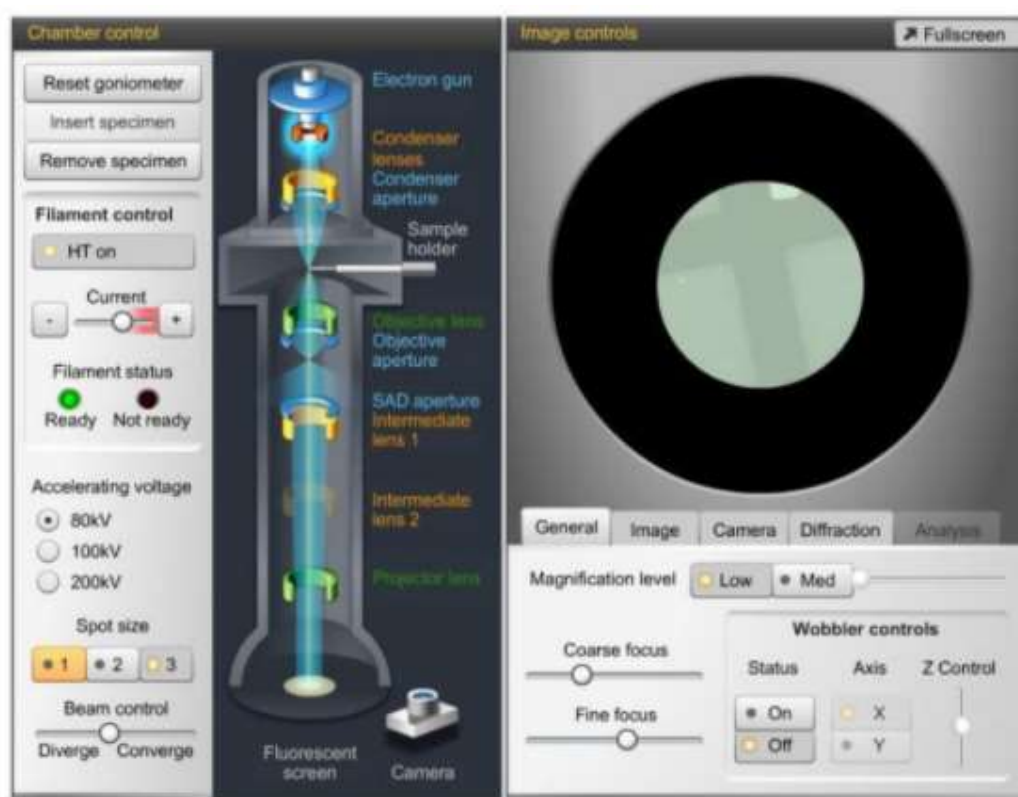


Рис. 20. Етап регулювання розміру досліджуваної області

6. Виберемо середнє збільшення. Найкраще юстувати мікроскоп при середньому збільшенні (близько 5000-10000x). Чим більше збільшення, тим точніше юстування.

7. Установимо конденсорну діафрагму. Цей процес є важливим для всіх видів використання ТЕМ. Діафрагми це отвори круглої форми в металі, які часто виготовляються з Pt або Mo (обидва вогнетривкі метали). Діафрагми використовуються для вибору (або виключення) певних електронів. Діафрагма конденсатора керує пучком, що випромінюється джерелом, дозволеному досягти цього простору. Тому це допомагає контролювати інтенсивність освітлення.

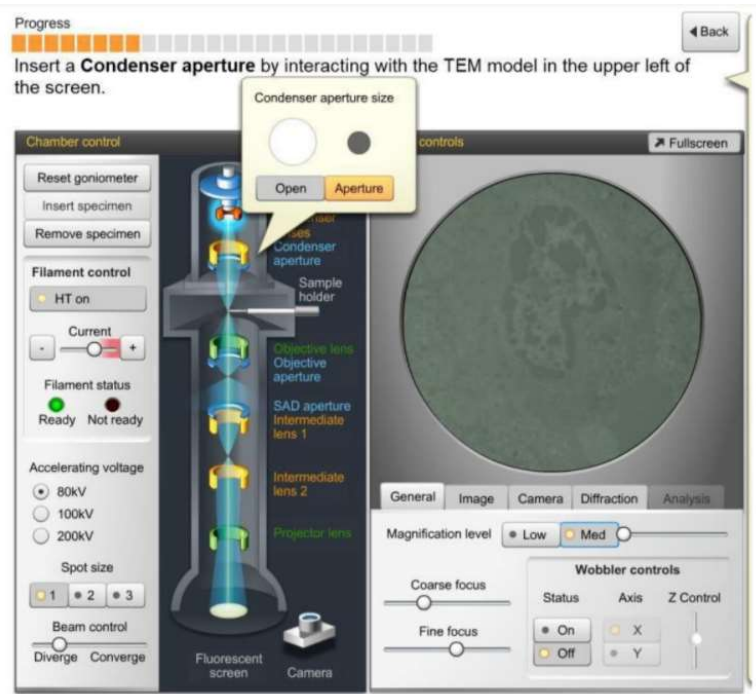


Рис. 21 Установка конденсорної діафрагми

8. Вставимо об'єктивну діафрагму. Об'єктивні діафрагми використовуються для вибору (або виключення) певних електронів, які потім використовуються для формування зображення. Зазвичай вибирають нерозсіяний промінь, так що виключаються розсіяні електрони, що створюють контраст у зображенні.

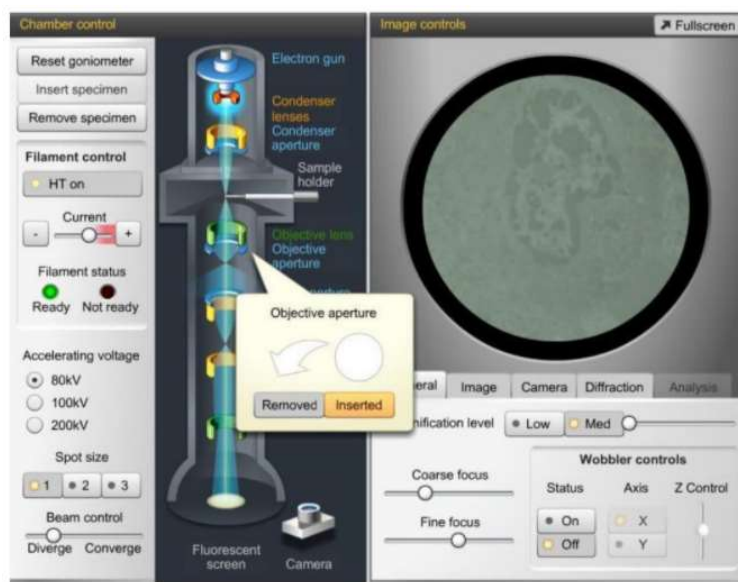


Рис. 22 Установка об'єктивної діафрагми

9. Якщо потрібно, розведіть промінь, поки зображення не заповнить весь екран.

10. Вибір дифракції. На цьому етапі об'єкту діафрагму видно на екрані, на фоні дифрактограми.

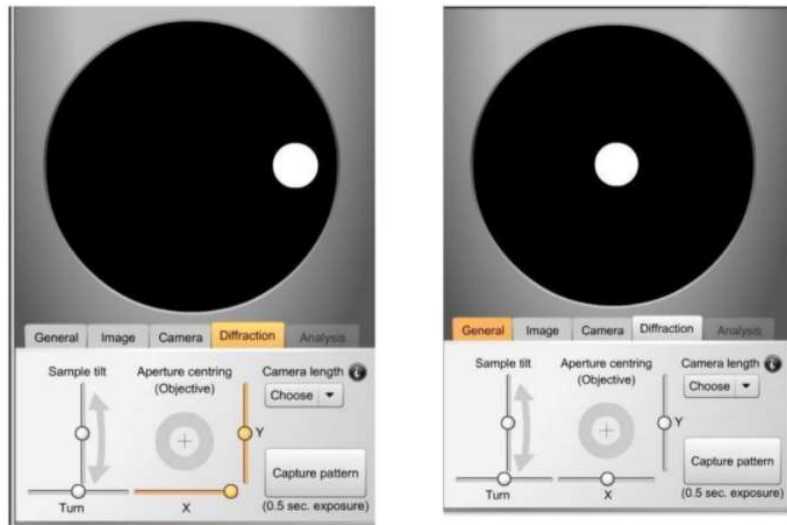


Рис. 23 Вибір дифракції

11. Переходячи до вкладки «Загальні» скористуємося повзунком «Збільшення», щоб додатково змінити рівень збільшення.

12. Встановимо фокус.

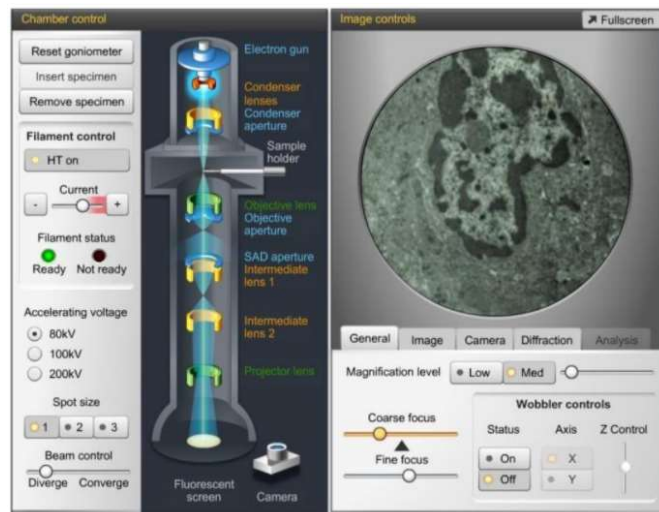


Рис. 24 Встановлення фокусу

13. Встановити еуцентричну висоту за допомогою воблера. Увімкніть воблер, виберіть напрямки коливання X або Y, а потім скористайтесь кнопкою Z, щоб зменшити коливання, щоб правильно встановити висоту зразка. У добре вирівняній та керованій ТЕМ це приведе зображення у фокус.

15. Перейдемо на вкладку "Зображення" та скористаймося повзунками "Астигматизм" для виправлення зображення.

16. Використаємо елементи керування позиціонуванням X та Y (на вкладці "Зображення"), щоб знайти область, яка цікавить.

17. Зробимо зображення та збережіть його, якщо потрібно.

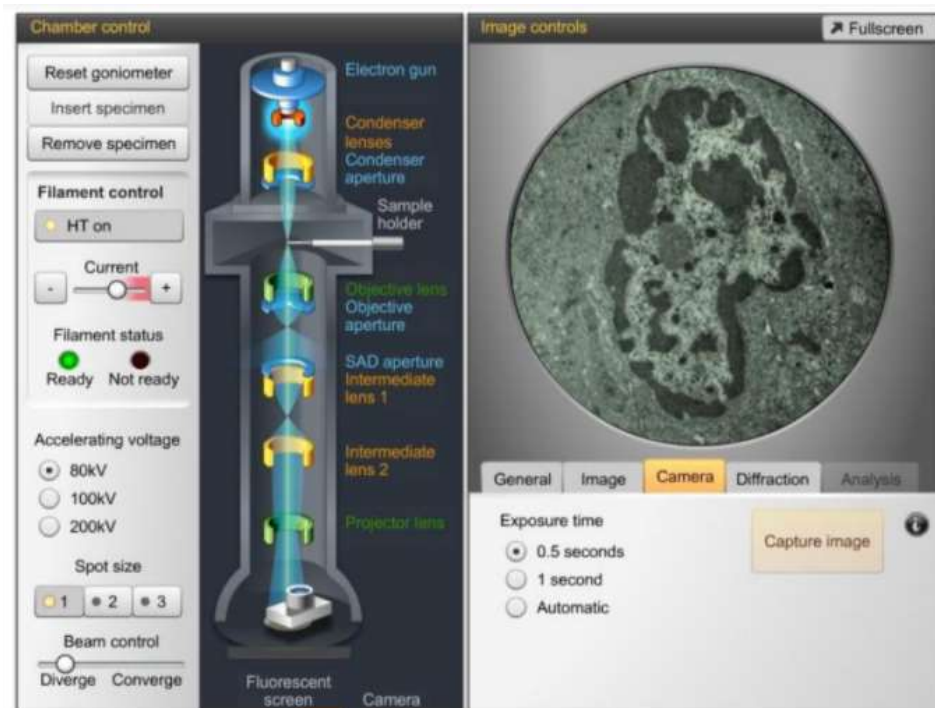


Рис. 25. Отриманий результат

3. АНАЛІЗ ДИСПЕРСНОСТІ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Важливими характеристиками дисперсних систем є розмір і форма частинок, так як більша частина властивостей системи залежить саме від них.

У реальній дисперсній системі можуть міститися частинки з різницею у розмірах у декілька порядків, визначення деякого середнього розміру частинок є недостатнім. Потрібно встановити розподіл частинок за розмірами.

Метод дисперсійного аналізу дозволяє визначити не тільки мінімальний, максимальний та середні розміри частинок, а й знайти їх відсотковий зміст в певному інтервалі розмірів. Форми частинок можуть бути досить різноманітними, тому для усереднення під розміром частинки мають на увазі еквівалентний діаметр.

Щоб отримати еквівалентні діаметри за допомоги програмного забезпечення Image Pro Plus необхідно завантажити зображення частинок (яке було отримано за допомоги растрового або трансмісійного електронного мікроскопів або оптичного мікроскопу) та встановити масштабну лінійку. Тобто співставити розміри пікселів з розмірами частинок, що знаходяться на фотографії (рис. 26-рис.27)

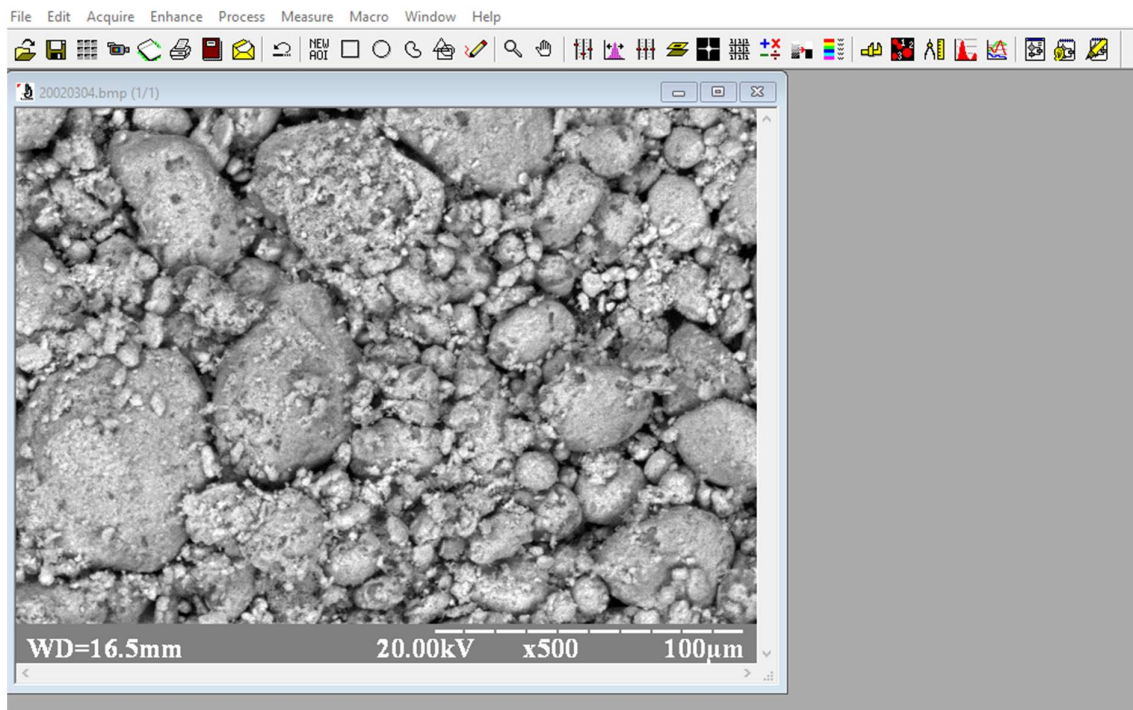


Рис. 26 Електронно-мікроскопічне зображення порошкового матеріалу

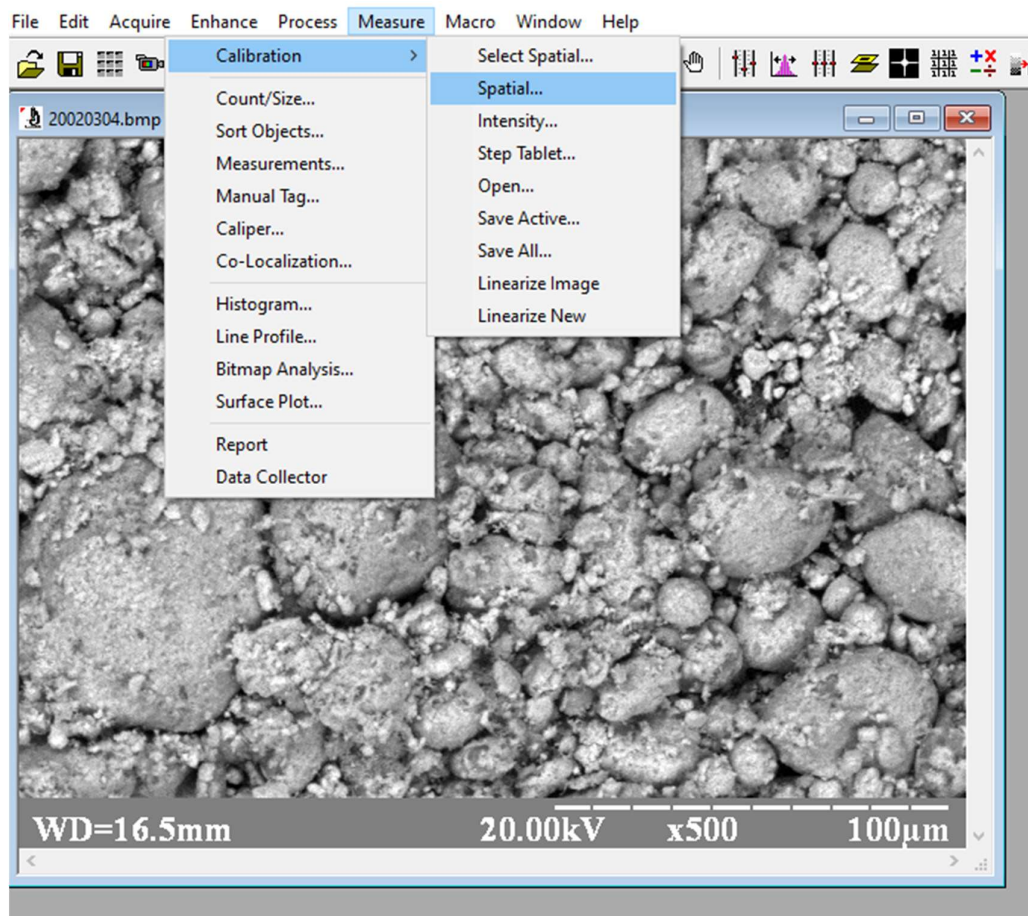


Рис. 27 Перший крок у виборі масштабної лінійки

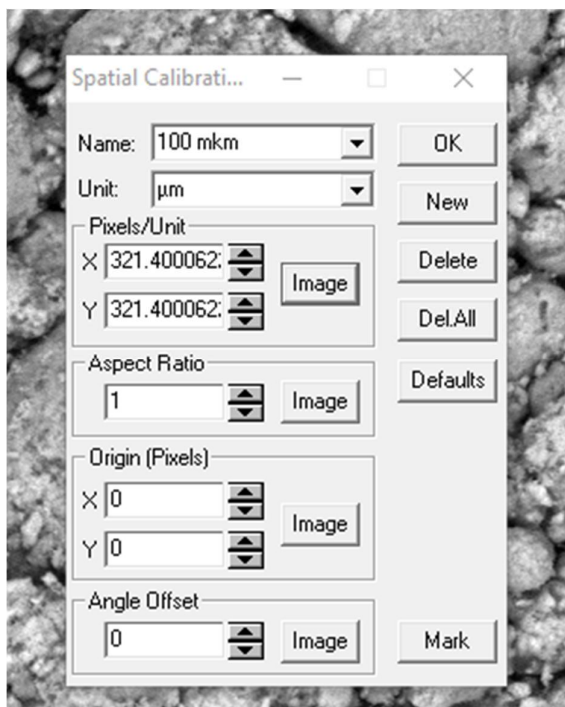


Рис. 28. Другий крок у виборі масштабної лінійки

Після встановлення масштабної лінійки можна перейти до визначення еквівалентних площ частинок. Можна обрати різні критерії для статистичного аналізу (еквівалентний діаметр, діаметр описаного кола тощо) (рис.29). Якщо частинки добре візуально розрізняються, то аналіз можна проводити в автоматичному режимі. В іншому випадку доведеться обводити частинки вручну.

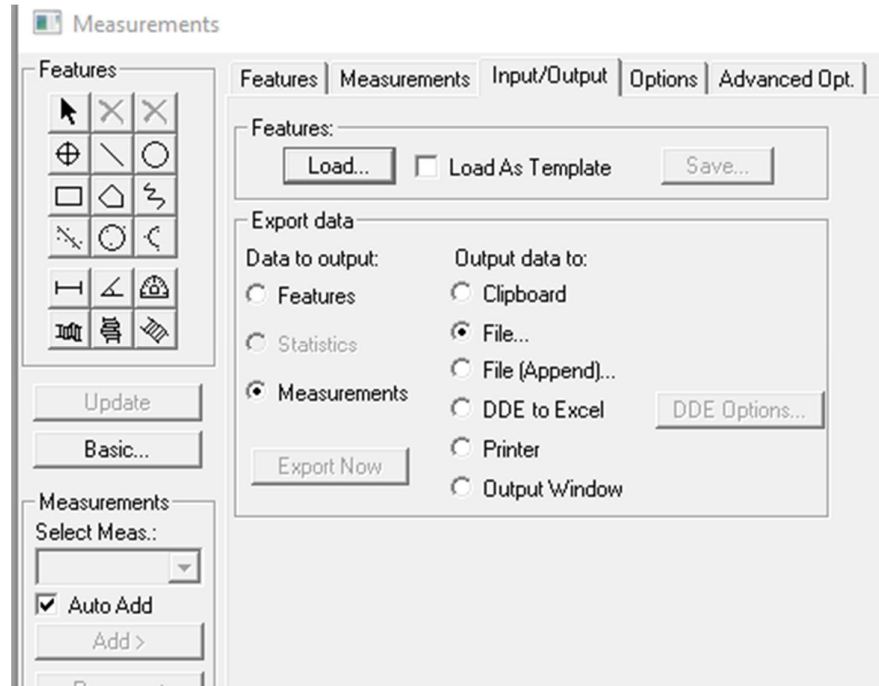


Рис. 29 Вибір параметру для статистичного аналізу

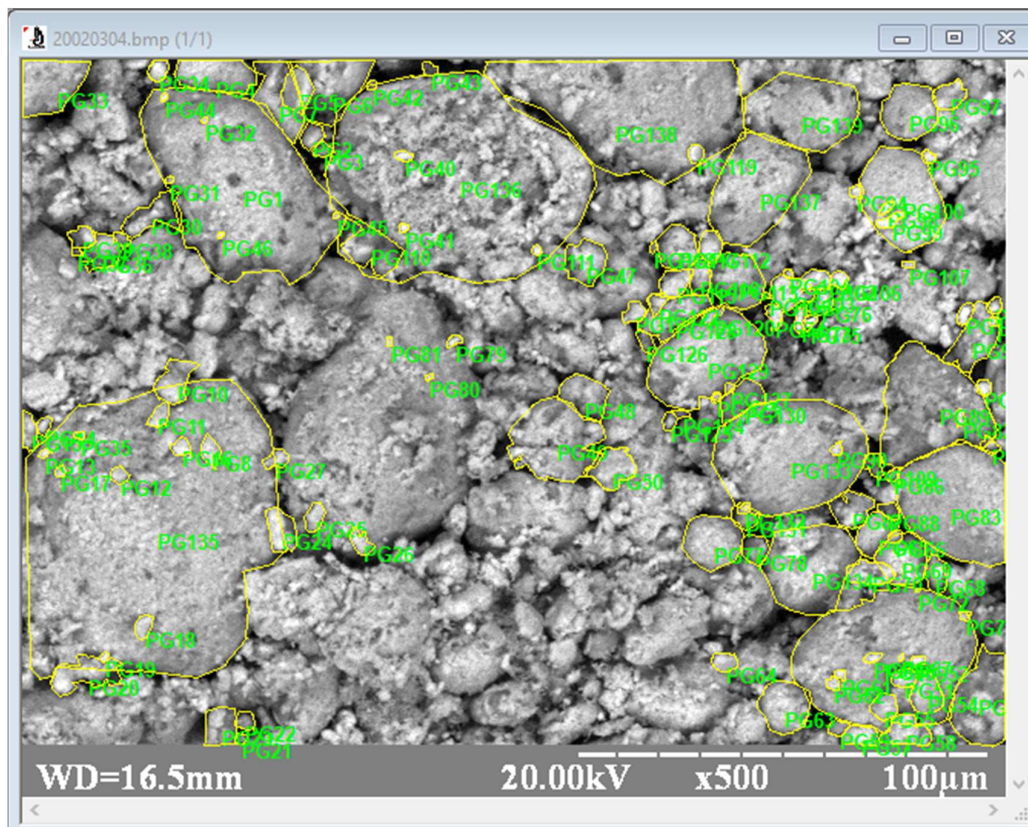


Рис. 30 Виділені границі частинок, які надалі аналізуватимуться

Measurements						
Features						
Features	Measurements	Input/Output	Options	Advanced Opt.		
Features	Measurement	Value	Nominal	Min. Tol.	Max. Tol.	
1 PG127	Area	.0014908	5.48230	-.0010	.0010	
1 PG128	Area	.0345311	126.9829	-.0010	.0010	
1 PG129	Area	.1349978	496.4329	-.0010	.0010	
1 PG130	Area	.020010	73.58386	-.0010	.0010	
1 PG131	Area	.0087416	32.14621	-.0010	.0010	
1 PG132	Area	.0021007	7.725059	-.0010	.0010	
1 PG133	Area	.2329280	856.5560	-.0010	.0010	
1 PG134	Area	.1094794	402.5931	-.0010	.0010	
1 PG135	Area	1.045693	3845.371	-.0010	.0010	
1 PG136	Area	.7152317	2630.151	-.0010	.0010	
1 PG137	Area	.1294410	475.9989	-.0010	.0010	
1 PG138	Area	.3557474	1308.205	-.0010	.0010	
1 PG139	Area	.1130806	415.8360	-.0010	.0010	

Рис. 31 Таблиця значень оброблених параметрів

Після того як буде отримано дані їх можна статистично обробити наприклад в Origin – побудувати гістограми, видначити середнє та дисперсію (рис. 32).

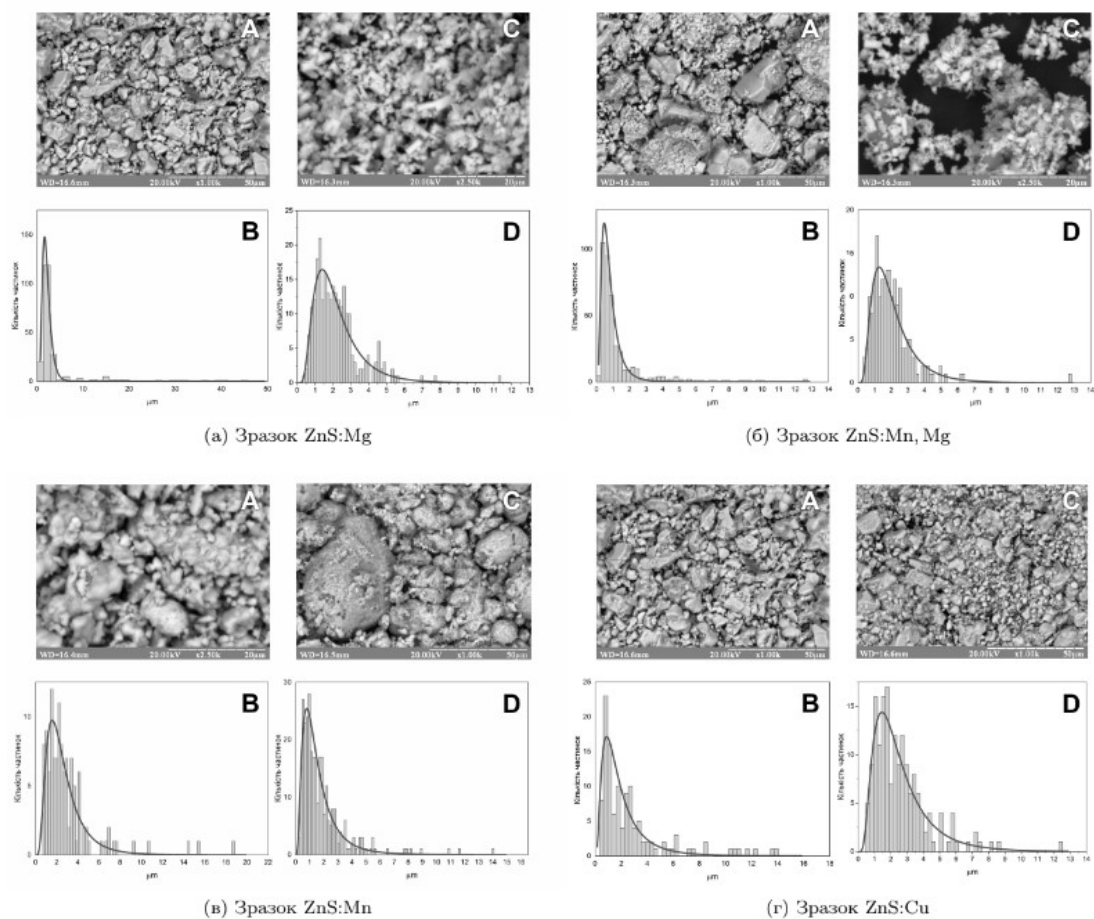


Рис. 32. Приклад гістограм розподілів, апроксимований логнормальними функціями

Наприклад у випадку логнормального розподілу середнє і дисперсія визначаються за формулами:

$$\langle d \rangle = e^{\ln d + \frac{\sigma^2}{2}}$$

$$D = e^{\sigma^2 - 1} e^{2 \ln d} \quad ^2$$

Таблиця 1. Приклад результату статистичної обробки зображення високодисперсного матеріалу. Наведено вередне і дисперсію

Зразок	$\langle d \rangle$, мкм	D , мкм ²
ZnS:Mg	2,17	0,93
ZnS:Mg mezo	2,23	1,83
ZnS:Mn, Mg	0,83	0,32
ZnS:Mn, Mg mezo	2,14	1,88
ZnS:Mn	2,72	3,19
ZnS:Mn mezo	1,68	1,86
ZnS:Cu	2,09	3,40
ZnS:Cu mezo	2,64	3,43

Список використаних джерел

1. <https://www.gel.usherbrooke.ca/casino/>
2. <https://myscope.training/>
3. <https://www.mediacy.com/imageproplus>