

Ю.О. Подчашинський, д.т.н., проф.  
А.В. Рижук, аспірант

Державний університет «Житомирська політехніка»

## Використання результатів фрактального аналізу поверхні та алгоритмів детекції відростків у тривимірних моделях зразків бурштину

У статті запропоновано переносити інформацію про поверхню зразка бурштину з сформованих зображень на реконструйовану тривимірну модель (mesh) цього зразка, а також виключати різкі просторові викиди на відтвореній моделі, які не відповідають особливостям зразка, а є похибками тривимірної реконструкції. Перенесення результатів фрактального аналізу поверхні на реконструйовану тривимірну модель зразка бурштину є важливим та комплексним етапом для детального дослідження та оцінки якості зразків бурштину.

Для вирішення вказаної задачі застосовано алгоритми дискретизація поверхні зразка шляхом формування репрезентативних центрів вокселів (елементарних одиниць тривимірної сцени, що являють кубик або точку в просторі) з усередненими нормальми. Також визначаються чотири основні характеристики вокселів, що притаманні точкам, які утворюють відросток на поверхні. Згідно цих характеристик відростком є різкий просторовий викид на відтвореній моделі, який не відповідає особливостям поверхні зразка, а обумовлений похибками тривимірної реконструкції. До вокселів, характеристики яких можна класифікувати як частини відростка, застосовуються алгоритми дилатації та ерозії, щоб отримати саму форму відростків. Отримана форма перевіряється за геометричними метриками на предмет того, чи схожа вона на шуканий артефакт. Визначені дані про відростки переносяться від воксельних центрів на реконструйовану тривимірну модель (mesh) цього зразка та місця дефектних зон видаляються з наступним закриттям однорідною текстурою.

Шляхом знаходження найкращого ракурса на зображеннях, що містять фрактальну інформацію, дані фрактального аналізу переносяться на тривимірну модель. Після виконання усіх кроків алгоритму отримуємо тривимірну модель з перенесеними даними фрактального аналізу з двомірних зображень. При цьому на тривимірній моделі визначено ділянки поверхні, що містять тріщини/вкраплення/інклюдії, які можуть вплинути на якість промислових виробів з бурштину. обробки та більш точно розраховувати наступні кроки для обробки бурштину. Все це є основою для оцінки якості та підвищення конкурентоспроможності промислових виробів з бурштину.

**Ключові слова:** тривимірна модель; зразок бурштину; фрактальний аналіз; видалення відростків; воксель; секвенція зображень; якість поверхні.

**Актуальність теми:** Бурштин є доволі цінним та лімітованим ресурсом на нашій Землі. Його видобування наносить значної шкоди навколишньому середовищу, навіть при дотриманні усіх правил та стандартів його видобутку. Отримана сировина з надр характеризується значними втратами під час обробки: лише її частина придатна для цільового використання, тоді як значна частка переходить у відходи. Запланована послідовність обробки та рішення щодо розкрою видобутого зразка базується лише на основі експертного висновку фахівця, чия думка є суб'єктивною. Тому для зменшення втрат при обробці та збереження більшої кількості об'єму видобутого зразка потрібно розвивати та удосконалювати: програмно-алгоритмічну складову систем технічного зору (СТЗ); методи та алгоритми тривимірної реконструкції просторових об'єктів (зразків бурштину), які будуть враховувати особливості поверхні цих зразків; методи фрактального аналізу для визначення дефектних зон тощо. Такі удосконалення програмно-алгоритмічних методів збільшать частку сировини, яка придатна для цільового використання, та покращить якість зразків та промислових виробів з бурштину шляхом виключення суб'єктивного людського фактору при оцінці зразків бурштину та плануванні їх обробки.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Питання оцінки, проектування та відтворення текстури поверхні розглянуто в праці [1], автори якої пропонують здійснювати вибір найкращих з сформованих зображень текстури відповідно до кожної грані. Також в роботі [2] значна увага приділяється зшиванню та згладжуванню текстур на тривимірній моделі, що отримані з різних зображень. Методи з даних робіт взагалі можуть бути використані для тривимірної візуалізації та оцінки якості поверхні зразків бурштину. Однак загальні методи та алгоритми комп'ютерної графіки повинні бути адаптовані до задачі формування тривимірних моделей саме зразків бурштину. При цьому потрібно відобразити на тривимірній моделі результати пошуку тріщин, вкраплень та інших дефектів, які виявляються шляхом аналізу фрактальної розмірності поверхні зразків за їх зображеннями.

**Метою статті** є розробка та удосконалення алгоритмів перенесення інформації про поверхню зразка бурштину з сформованих зображень на реконструйовану тривимірну модель (меш) цього зразка, а також виключення різких просторових викидів на відтвореній моделі, які не відповідають особливостям зразка, а є похибками тривимірної реконструкції. Особливістю тривимірної реконструкції є те, що до зображення додається інформація, що формується за допомогою фрактального аналізу поверхні та надає вичерпну інформацію про положення тріщин, вкраплень, дефектів на поверхні зразка бурштину. Все це є основою для оцінки якості та підвищення конкурентоспроможності промислових виробів з бурштину.

**Викладення основного матеріалу.** Бурштином називають смоли хвойних дерев, що утворилась 45–50 млн років тому та що зберіглась до сьогодення. Найчастіше смоли використовують в парфумерії, електроніці, медицині та в ювелірній справі. Але особливу цінність він становить саме для палеонтології, так як в бурштин можуть потрапити тогочасні тварини. Свою високу ціну зумовлює значними витратами матеріалу під час його обробки. На якість обробки впливають навички фахівця. Причому якщо дати один і той самий зразок двом різним експертам, то вони по-різному визначать дефектні зони та по-різному оброблять зразок. Що вводить в процес обробки певну випадковість у вигляді людського фактору. Для вирішення цієї проблеми потрібно виключити суб'єктивний чинник та ввести певну детермінованість. Тому потрібно реалізувати систему, де людина частково приймає участі в оцінюванні дефектних зон, вся основна задача покладається на СТЗ, яка шукає проблемні ділянки та підсвічує їх. А вже надалі людина оператор перевіряє чи дійсно всі зони визначені вірно в силу рівня її кваліфікації. Такий підхід дозволить отримувати ідентичні висновки, що до дефектних зон, що знаходяться на поверхні бурштину та вже далі базуючись на цій інформації планувати подальші кроки, що до обробки. Та більш точно отримувати різноманітну геометричну інформацію в цифровому вигляді, маючи тривимірну реконструкцію зразка.

Тривимірна реконструкція на основі набору зображень базується на формулі проєкції тривимірної точки на площину та на найвідоміших алгоритмах фотогеометрії structure from motion (SFM) [3, 4] та multi view stereo (MVS) [5]. Першим кроком було отримання секвенції зображень зразка бурштину з різних ракурсів по колу. Вся секвенція налічує 16 зображень. Перед зіставленням ключових точок виконується калібрування камери для отримання внутрішніх параметрів. Для даних зображень на основі scale invariant feature transform SIFT [4] використовується пошук та зіставлення ключових точок. Між отриманням три вимірних координат зіставлених точок на зображенні виконується коригування пучка. На виході отримуються параметри камери, а саме: обертання, переміщення.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z} \begin{bmatrix} kf & 0 & c_x & 0 \\ 0 & lf & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $f$  – фокусна відстань камери,  $u$  та  $v$  – координати точки на площині зображення з початком двовимірної системи координат у лівому нижньому куті,  $k$  та  $l$  – параметри масштабу, що відображають розміри площі пікселя на світлочутливій поверхні,  $c_x$  та  $c_y$  – координати оптичного центру камери на площині зображення,  $r$  та  $t$  – параметри обертання та трансляції (параметри зовнішньої орієнтації камери).

Після SFM алгоритму отримується тривимірна структура точок (розріджена хмара) та положення камер, що буде основою для MVS алгоритму. Обираються пари зображень які мають найбільше спільних тривимірних точок. Також фільтруються досить віддалені та досить близькі базові лінії між камерами. Відбувається пошук карти глибини між зображеннями та на їх основі будується щільна хмара точок. На виході маємо щільну хмару точок, що повторює форму досліджуваного зразка бурштину. Але через можливі неточності, через різноманітні шуми на зображеннях, високі значення репроекційних помилок під час реконструкції, неточності в калібруванні камери, можливі різкі викиди на отриманій хмарі, що погіршать реконструкцію.

Паралельно до процесу реконструкції за допомогою SFM та MVS алгоритмів виявляються аномальні зони, тобто зони, які містять тріщини/вкраплення/інклюдії. Для виявлення використовується фрактальний аналіз так як в попередніх роботах досліджено кореляцію між такими дефектами та значенням фрактальної розмірності [6]. Тому секвенція зображень обробляється фрактальним аналізом, а саме визначення фрактальної розмірності за допомогою покращеного алгоритму adaptive box-counting з використанням інтегральних зображень. Він допомагає пришвидшити ітеративний процес фрактального аналізу та забезпечити точне виявлення аномальних зон на двовірних зображеннях зразка бурштину. Результат такого аналізу зображено на рисунку 1.

Як видно з рисунка 1, данні фрактального аналізу співпадають з зонами які не є обробленими, містять різноманітні лунки, дефекти та потребують особливої уваги. І постає завдання перенесення цих даних на тривимірну реконструйовану модель зразка бурштину. Так як згадувалось раніше через неточності під час реконструкції можливі різкі викиди на меші, що не зовсім відповідають досліджуваній формі мешу і в подальшому можуть спричинити проблеми під час планування та обробки. Тому потрібно додати проміжний процес фільтрування перед самим безпосереднім проєктування результатів фрактального аналізу на три вимірну структуру.

Для виявлення та фільтрування різких викидів на меші можна спиратись на походження та фізико-хімічні властивості бурштину. Бурштин це природна смола, що утворюється в землі під дією високого тиску, ерозій та може переноситись течіями річок. Сукупність наведених чинників визначає процес формування форми зразка бурштину. Та при таких сурових умовах утворена геометрія зразку не може містити продовгуватих елементів у вигляді відростків, так вони з плином часу зазнаватимуть руйнування та відокремлення. Тому на основі таких факторів потрібно реалізувати алгоритм виявлення, видалення та закриття отриманих отворів на тривимірних моделях бурштину.

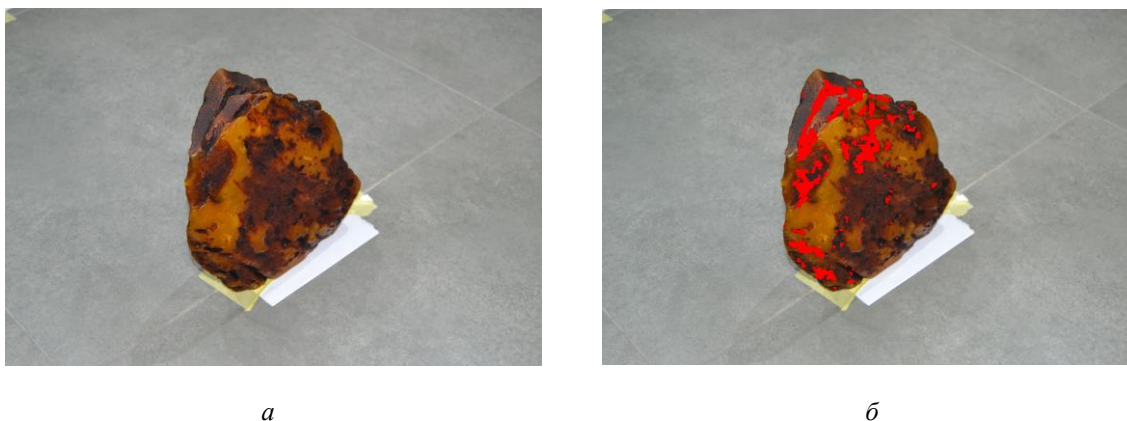


Рис. 1. Тривимірна модель зразка бурштину, отримана секвенцією 16 зображень поверхні: а) – зображення до перенесення результатів фрактального аналізу; б) – зображення після перенесення результатів фрактального аналізу з позначеними дефектними зонами червоним кольором

Для детекції відростків важливо розуміти властивості самого видовження за допомогою яких математичних законів вони визначаються. Для цього введемо безрозмірний показник видовження фрагмента поверхні. Тому дану поверхню можна апроксимувати тілом обертання стрижневого типу, що в ідеалі це є циліндром. Критерій для визначення відростка записується у вигляді:

$$\frac{L}{t} \geq \tau_L, \quad (2)$$

де  $L$  – значення довжини відростка,  $t$  – значення локальної товщини відростка,  $\tau_L$  – коефіцієнт порогового значення та чутливості відношення довжини до товщини відростка. На основі такого відношення буде створено алгоритм котрий буде визначати, видаляти та закривати утворені отвори на меші. Для реалізації такого алгоритму була обрана мова програмування Python. Найпершим етапом пошуку таких відростків на тривимірному меші є узгодження та приведення до стану який буде придатним для подальшого аналізу та обробки. Так як щільність мешу досить висока  $\approx 3,4$  млн точок, так як була отримана з MVS алгоритму, то важливо видалити усі непотрібні точки, що не утворюють трикутники та не несуть в собі інформативні данні про поверхню. Після такого кроку фільтрування кожна вершина має свій сенс, будучи частиною поверхні та не матиме впливу на статистику в наступних обрахунках. Так як подальші кроки включатимуть в себе оцінювання густини усього мешу, вокселізація, обрахунок фрактальної розмірності та ін.

Для більш швидшого виконання алгоритмів та обрахунку даних з тривимірної хмари точок бажано використовувати бібліотеку NumPy, так як звичайні бібліотеки котрі заточені під роботу з тривимірними моделями мають власні типи для роботи тривимірними елементами і не завжди оптимізовані під швидкодію. Тому для стандартизації і додаткової оптимізації рекомендовано перетворити тип у векторизовану форму бібліотеки NumPy. Також аргументацією вибору даної бібліотеки є уніфікованість формату даних. Більшість сучасних бібліотек очікують в якості аргументів саме NumPy формат. Тому для подальшого масштабування застосунку та інтеграції додаткових модулів (за потреби) рекомендовано використовувати бібліотеку NumPy [7]. Після конвертації і приведення даних та їх типів в стандартизований формат відбувається пошук середньої відстані між сусідами тобто густина точок усього мешу. Рахувати усі точки не раціонально, тому обирається випадкова репрезентативна вибірка з 30.000 точок. Цієї кількості буде достатньо, щоб отримати інформацію про середню відстань між сусідами побудувавши KD-дерево сусідства для ефективного пошуку сусідів між собою. Для отримання самих відстаней між сусідами в побудованому KD-дереві для кожної точки з випадкової вибірки знаходяться її сусіди за допомогою функції `search_knn_vector_3d`, причому після виконання функції буде повернуто 2 точки. Перша сама шукана вершина, друга вершина найближчого сусіда для шуканої точки. Ще одним результатом буде їх евклідова відстань в квадраті. Вже з якої обрахувавши корінь отримаємо відстань між сусідами та формуємо масив цих відстаней для усієї випадкової вибірки з 30.000 точок.

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}. \quad (3)$$

Для визначення значення відстані між сусідами використовується пошук медіани створеного масиву відстаней. Використання медіани обумовлене тим, що саме вона гарантує отримання достовірної відстані з усієї вибірки та різкі відхилення від середніх значень не матимуть жодного впливу на саме шукане значення, як у випадку пошуку математичного очікування, де різкі викиди мають вплив на формування фінального середнього значення. І на основі отриманої відстані розраховуються відповідні значення для вокселізації, масштаби для фрактального аналізу, радіуси для морфологічних операцій, а саме дилатація та ерозії.

Детекція відростків [8–10] на поверхні зразка бурштину починається з дослідження неоднорідності поверхні. Тому використання фрактального аналізу знову є ефективним інструментом для визначення таких неоднорідних структур. Для зменшення розмірності задачі, згладження шумів та швидкого фрактального обрахунку поверхні рекомендується спростити структуру тобто вокселізувати її. Надавши кожному вокселю середню інформацію про окіл який він охоплює. Для цього відбувається пошук мінімальної координати по усім вершинам. Ця точка буде відповідною для початку вокселізації.

$$V_{min} = (\min x_i, \min y_i, \min z_i). \quad (4)$$

Такий підхід надає відповідну точку для побудови рівномірної сітки з визначеним попередньо кроком для вокселізації та самі індекси вокселів не будуть від'ємними. Для кожної точки тривимірної моделі розраховується індекс вокселя якому вона буде належати. Якщо дві точки потрапляють в один і той самий воксель, то отримують однаковий вектор  $k_i$ .

$$k_i = \left\lfloor \frac{v_i - V_{min}}{vox} \right\rfloor, \quad (5)$$

де  $k_i$  – цілочисельні координати вокселя у тривимірній сітці,  $v_i$  – координати точки для якої розраховується відповідний воксель,  $V_{min}$  – початкова координати відносно якої будується сітка,  $vox$  – розмір воксельної сітки. Надалі знаходяться унікальні тривимірні індекси вокселів. Після чого для кожного отриманого вокселя розраховується його центр. Обираються усі точки, що потрапили в окіл даного вокселя та обраховується їх середнє арифметичне координат. Таким чином після обрахунку усіх цих параметрів маємо спрощену та згладжену хмару точок, в якій відсутні незначні шуми утворені текстурою та точки, що утворюють поверхню є узагальненими центрами вокселів. Причому масивні об'єкти у вигляді відростків та інших форм лишаються та загальна форма лишається незмінною.

Наступним ключовим етапом після зменшення розмірності задачі є опис локальної орієнтації поверхні навколо кожного центру. Такий показник демонструє середнє значення локальної характеристики текстури поверхні та неоднорідність площі, що входить у воксельний центр. Висока варіативність нормалей площин, є типовою для ребер, різка зміна форми, перегинів та тонких відростків, що шукаються. Тому такий показник є досить інформативним для визначення відростків. Для визначення узгодженості пари нормалей використовується їх модуль скалярного добутку.

$$|n_j^T n_k| = |\cos \theta_{jk}|, \quad (6)$$

де,  $n_o$  та  $n_k$  – вектори нормалей,  $\theta_{jk}$  – кут між нормалями. Поверхні, що мають різкі змінам напрямків нормалей матимуть малі скалярні добутки, тоді як гладкі апроксимуватимуть до 1. Для швидкого пошуку сусідніх нормалей знову будується KD-дерево, що пришвидшує перебір та отримані данні нормалізуються до одиничної довжини. Такий підхід надає структуру, що містить випадкові поодинокі воксельні центри, скалярні добутки яких малі, спричинені неоднорідністю текстури, а не справжньою зміною форми. Для фільтрації таких точкових проявів, потрібно спиратись на їх сусідів. Тобто якщо це справжня зміна форми, а не поодинокі випадки, то усі сусідні вокселіні центри, що описують окремий фрагмент матимуть малі значення скалярних добутків. Щоб це перевірити формується 3 радіуси на яких обраховується кількість вокселів за аналогією до визначення фрактальної розмірності.

$$D_{12}(i) = \frac{\ln\left(\frac{n(i, R_2)+1}{n(i, R_1)+1}\right)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (7)$$

де  $n(i, R_2)$  – кількість сусідів в заданому радіусі для відповідного пікселя. Використання 3го радіусу застосовується для перевірки, чи зберігається ріст на ширшому масштабі. Також на цьому етапі застосовується перевірка на лінійність шляхом обрахунку principal component analysis (PCA) в заданому радіусі. Данні ознаки надають ряд інформативних значень  $D_{12}$  – демонструє як поводить себе структура, а визначення лінійності демонструє наскільки витягнуті точки вздовж однієї осі. Поєднання цих ознак зменшує вірогідність спотворень, так як окремо ці значення можуть демонструвати викиди, а їх поєднання компенсують один одного. Також потрібно обраховувати густину. Відросткам, що сформовані різкими викидами, притаманна низька густина, так як це декілька точок, що не належать загальній структурі та знаходяться на певні відстані від основного мешу. Для кожного значення знаходиться пороговий коефіцієнт який найкраще буде визначати множину вокселів, які з високою ймовірністю будуть відростками. Даний алгоритм формує булеву маску кандидатів воксельних центрів, що ймовірно є відростками.

Аналізуючи секвенцію зображень можна помітити, що зразок бурштину стоїть на підлозі, та при реконструкції частина підлоги стала частиною мешу. Так як для дослідження вона не несе ніякої

інформації, рекомендовано відсікти її шляхом застосування алгоритму RANSAC. Пошук такої площини відбувається на основі точок мешу, а не попередньо обрахованих воксельних центрів. Усі воксельні центри, що є кандидатами на відсікання та знаходяться на підлозі відкидаються з масиву кандидатів.

Для перевірки воксельних центрів на належність відросткам та для подальшого видалення відростків застосовується методи дилатації та ерозії [8, 10]. Нарощування точок має відбуватись з перевіркою, чи сусідня точка має підвищені значення параметрів, які притаманні структурі відростка. Після такої обробки маска відростків збільшується та локально формує окремі їх форми. Після такого розширення може виникати зайва геометрія у вигляді мостів, хвостів. За допомогою ерозії відбувається видалення тих точок, що не мають достатньої підтримки з боку сусідніх центрів. Отримана маска з ймовірними відростками додатково перевіряється на елемент продовгуватості. Виконання такого кроку забезпечує додаткову перевірку, так як до цієї маски могли потрапити точки які належать ребрам, або випадковим пікам на площині, або шумові згустки. Для кожної окремої булевої маски розраховується головна вісь, лінійність та довжина. На основі цих параметрів оцінюється товщина та стрункість досліджуваної форми. Елементи, які є продовгуватими та мають малу площу поперечного перерізу, маркуються як відростки. Після цього кроку відбувається зворотне поширення на воксельні центри, що були позначені булевою маскою як відросток. Далі цю інформацію переносять на меш та видаляють відростки (рис. 2).

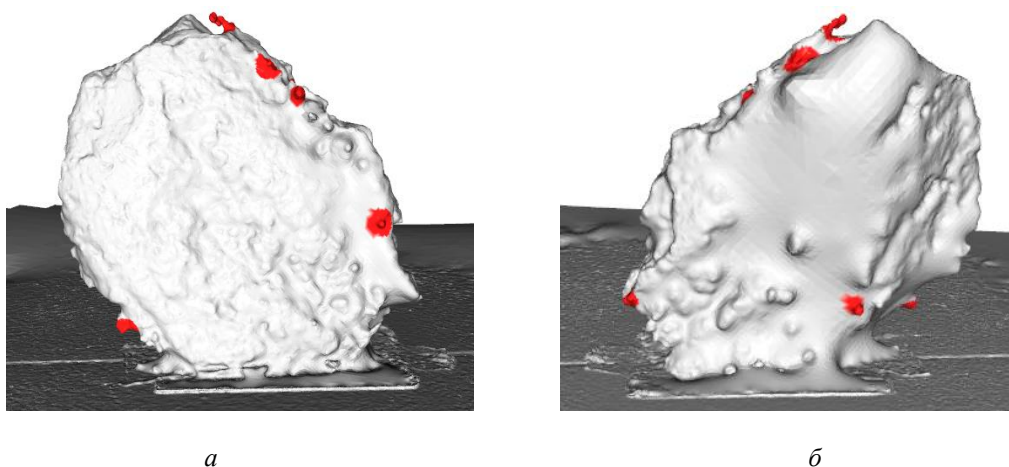


Рис. 2. Відображення результатів застосування алгоритму детекції відростків (червоним кольором позначено аномальні зони): а) – вид спереду; б) – вид ззаду

Одразу після видалення відростків постає питання закриття утворених отворів на місці видалених відростків. Для цього аналізуються усі ребра на меші та відбувається пошук таких, що належать тільки одному трикутнику сітки. На основі таких ребер формуються петлі (loops). Причому до знайдених петель потрапить і край самої реконструкції (край підлоги). Для фільтрації такої петлі потрібно знайти найдовшу петлю за допомогою проектування всіх наявних петель на двомірну поверхню та не враховувати її під час закриття отворів. До отворів, які потрібно закрити, застосовується перехід від тривимірної петлі до двовимірного полігону, на який накладається шестикутна сітка з рівномірною щільністю. Відкидаються точки, що лежать поза полігоном та за допомогою триангуляції Делоне формуються трикутники, які в подальшому переносяться з площину на тривимірну модель. Щоб адаптувати планарну латку до тривимірної структури, для нової точки знаходяться декілька найближчих вершин та обирається середнє значення координат і застосовується згладжування Лапласа.

Після того як відростки виключено з тривимірної моделі зразка, постає задача перенесення результатів фрактального аналізу на отриману модель (рис. 3). Для цього потрібно попередньо обрахувати внутрішні та зовнішні параметри камери, що формувала зображення, а також значення радіальної та тангенціальної дисторсії. Для кожної вершини моделі потрібно обрати найкраще джерело кольору, тобто найкращий ракурс камери з якої видно цю вершину. Ідеальним ракурсом вважається такий, що має кут між поверхнею зразка та оптичною віссю камери  $90^\circ$ . Але в практичній реалізації обирається якомога найближчий до вказаної вимоги кут. Дотримання цієї вимоги зменшує вплив перспективних спотворень, розмиття поверхні та похибки візуалізації на межах об'єктів. У випадку, якщо не було знайдено оптимального ракурсу для отримання даних кольору, значення кольору не оновлюється.

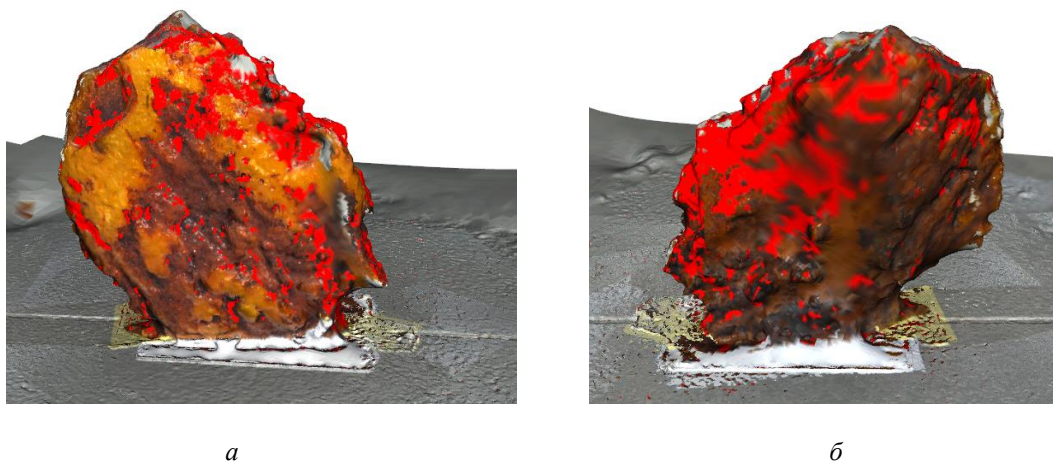


Рис. 3. Перенесення результатів фрактального аналізу на тривимірну модель:  
а) – вид спереду; б) – вид ззаду

Як видно з рисунка 3, на вигляді ззаду текстура розтягнута, так як щільність точок значно менша, ніж на іншій частині сітки. Це пов'язано з тим, що при реконструкції тривимірної моделі було недостатнім перекриття цієї зони на зображеннях. Збільшення кількості зображень цієї ділянки з додаткових ракурсів може сприяти більш точній та якіснішій реконструкції та усуне розмиття текстури поверхні тривимірної моделі.

**Висновки.** Розроблено алгоритм виключення різких просторових викидів (відростків) на реконструйованій тривимірній моделі зразків бурштину, що використовуються для виготовлення промислових виробів. Такі викиди не відповідають особливостям зразка, а є похибками тривимірної реконструкції.

Для вирішення вказаної задачі застосовано алгоритми дискретизація поверхні зразка шляхом формування репрезентативних центрів вокселів (елементарних одиниць тривимірної сцени, що являють кубик або точку в просторі) з усередненими нормальними. Згідно цих характеристик відростком є різкий просторовий викид на відтвореній моделі, який не відповідає особливостям поверхні зразка, а обумовлений похибками тривимірної реконструкції. Також визначаються чотири основні характеристики вокселів, що притаманні точкам, які утворюють відросток на поверхні. Така ділянка тривимірної моделі перевіряється за геометричними метриками на предмет того, чи схожа вона на шуканий артефакт. Було проведено вокселізацію для забезпечення більш точної оцінки локальних властивостей поверхні зразка. Розраховано локальні особливості для воксельних центрів, а саме середнє значення нормалі центрів та їх дисперсію, густину та лінійність. Визначення таких параметрів дозволяє більш точно виявляти елементи тривимірної моделі, які належать відросткам.

Для їх виявлення також застосовуються алгоритми дилатації та ерозії з метою визначення повної форми даного артефакта. Отримані артефакти перевіряються, чи дійсно вони є відростками. Отримані результати переносяться з масиву вокселів на первинну тривимірну модель зразків бурштину. При цьому видаляються відростки, а отвори, що виникли на поверхні тривимірної моделі, закриваються однорідною текстурою. Також було досліджено алгоритм SFM/MVS, спрямований на підвищення як геометричної так і візуальної якості тривимірної моделі зразка.

Перенесення результатів фрактального аналізу поверхні на реконструйовану тривимірну модель зразка бурштину є важливим та комплексним етапом для детального дослідження та оцінки якості зразків бурштину. Розроблено алгоритм перенесення інформацію про поверхню зразка бурштину з сформованих зображень на реконструйовану тривимірну модель (меш) цього зразка. Для перенесення результатів фрактального аналізу на тривимірну модель виконується пошук найкращого ракурса для кожної точки відповідно до нормалі площини. Результатом такого алгоритму є тривимірна структура з відміченими зонами які містять тріщини, вкраплення.

Після виконання усіх кроків алгоритму отримуємо тривимірну модель з перенесеними даними фрактального аналізу з двомірних зображень. При цьому на тривимірній моделі визначено ділянки поверхні, що містять тріщини/вкраплення/інклюдзії, які можуть вплинути на якість промислових виробів з бурштину, обробки та більш точно розраховувати наступні кроки для обробки бурштину. Все це є основою для оцінки якості та підвищення конкурентоспроможності промислових виробів з бурштину.

## Список використаної літератури:

1. Consistent Multi-View Texturing of Detailed 3D Surface Models / *K.Bittner and other* // Photogrammetric Image Analysis. – 2015 [Electronic resource]. – Access mode : [https://www.researchgate.net/publication/312172330\\_Conistent\\_Multi-View\\_Texturing\\_of\\_Detailed\\_3D\\_Surface\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/312172330_Conistent_Multi-View_Texturing_of_Detailed_3D_Surface_Models).
2. 3D Texture Mapping in Multi-view Reconstruction / *Z.Chen and other* // Lecture Notes in Computer Science.
3. *Chahat D.S.* Structure from Motion / *D.S. Chahat* // CMSC426: Computer Vision [Electronic resource]. – Access mode : <https://cmsc426.github.io/sfm/>.
4. Research of Methods for Determining Key Points for 3D Modeling of Amber Samples / *Yu.Podchashynskyi, A.Ryzhuk, O.Luhovykh, L.Chepiuk* // Journal of Information Systems Engineering and Management. – 2025. – Vol. 10, № 16s. – P. 784–801. DOI: 10.52783/jisem.v10i16s.2665.
5. *Kholil M.* 3D reconstruction using Structure From Motion (SFM) algorithm and Multi View Stereo (MVS) based on computer vision / *M.Kholil, I.Ismanto, M.Fu'ad* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1073. DOI: 10.1088/1757-899X/1073/1/012066.
6. Фрактальні методи аналізу та класифікації бурштину на основі його відеозображень / *Ю.О. Подчашинський та ін.* // Синергетика, фрактали і нові технології, 3–5 червня. – Житомир : Поліський національний університет, 2024. – С. 57–64.
7. Why is Numpy faster in Python? / *Geeksforgeeks*. – 2021 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.geeksforgeeks.org/python/why-numpy-is-faster-in-python/>.
8. *Xiong Z.* Computer Vision / *Z.Xiong*. – INTECH, 2008. – 538 p.
9. *Solem J.E.* Programming computer vision with Python / *J.E. Solem*. – Beijing ; Sebastopol ; CA : O'Reilly: Internet Archive, 2012. – 300 p.
10. Thresholding, Roberts, Prewitt, Sobel, and Edge Detection / Digital Image Processing in C. – Chapter 9 [Electronic resource]. – Access mode : <https://medium.com/@wilson.linzhe/digital-image-processing-in-c-chapter-9-thresholding-roberts-prewitt-sobel-and-edge-e7428405ede3>.

## References:

1. Bittner, K. et al. (2015), «Consistent Multi-View Texturing of Detailed 3D Surface Models», *Photogrammetric Image Analysis*, [Online], available at: [https://www.researchgate.net/publication/312172330\\_Conistent\\_Multi-View\\_Texturing\\_of\\_Detailed\\_3D\\_Surface\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/312172330_Conistent_Multi-View_Texturing_of_Detailed_3D_Surface_Models)
2. Chen, Z. et al., «3D Texture Mapping in Multi-view Reconstruction», *Lecture Notes in Computer Science*.
3. Chahat, D.S., «Structure from Motion», *CMSC426: Computer Vision*, [Online], available at: <https://cmsc426.github.io/sfm/>
4. Podchashynskyi, Yu., Ryzhuk, A., Luhovykh, O. and Chepiuk, L. (2025), «Research of Methods for Determining Key Points for 3D Modeling of Amber Samples», *Journal of Information Systems Engineering and Management*, Vol. 10, No. 16s, pp. 784–801, doi: 10.52783/jisem.v10i16s.2665.
5. Kholil, M., Ismanto, I. and Fu'ad, M. (2021), «3D reconstruction using Structure From Motion (SFM) algorithm and Multi View Stereo (MVS) based on computer vision», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1073, doi: 10.1088/1757-899X/1073/1/012066.
6. Podchashynskyi, Yu.O. et al. (2024), «Fraktalni metody analizu ta klasyfikatsii burshtynu na osnovi yoho videozobrazhen», *Synerhetyka, fraktaly i novi tekhnologii*, 3–5 chervnia, Poliskyi natsionalnyi universytet, Zhytomyr, pp. 57–64.
7. «Why is Numpy faster in Python?» (2021), *Geeksforgeeks*, [Online], available at: <https://www.geeksforgeeks.org/python/why-numpy-is-faster-in-python/>
8. Xiong, Z. (2008), *Computer Vision*, INTECH, 538 p.
9. Solem, J.E. (2012), *Programming computer vision with Python*, O'Reilly: Internet Archive, Beijing, Sebastopol, CA, 300 p.
10. «Thresholding, Roberts, Prewitt, Sobel, and Edge Detection», *Digital Image Processing in C*, Chapter 9, [Online], available at: <https://medium.com/@wilson.linzhe/digital-image-processing-in-c-chapter-9-thresholding-roberts-prewitt-sobel-and-edge-e7428405ede3>

**Подчашинський** Юрій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-8344-6061>.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- метрологія, засоби вимірювання;
- інформаційні системи та технології.

**Рижук** Андрій Вікторович – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- метрологія, засоби вимірювання.

**Podchashynskiy Yu.O., Ryzhuk A.V.**

**Using the results of fractal surface analysis and process detection algorithms in three-dimensional models of amber samples**

The article proposes to transfer information about the surface of an amber sample from the generated images to a reconstructed three-dimensional model (mesh) of this sample, as well as to exclude sharp spatial outliers on the reproduced model that do not correspond to the characteristics of the sample, but are errors of three-dimensional reconstruction. Transferring the results of fractal surface analysis to a reconstructed three-dimensional model of an amber sample is an important and complex stage for detailed research and assessment of the quality of amber samples.

To solve this problem, algorithms were used for the discretization of the sample surface by forming representative centers of voxels (elementary units of a three-dimensional scene, representing a cube or a point in space) with averaged normals. Four main characteristics of voxels inherent to points that form a process on the surface are also determined. According to these characteristics, a process is a sharp spatial outlier on the reconstructed model that does not correspond to the characteristics of the sample surface, but is caused by errors in three-dimensional reconstruction. Dilation and erosion algorithms are applied to voxels whose characteristics can be classified as parts of a process to obtain the shape of the processes themselves. The resulting shape is checked by geometric metrics to see if it is similar to the desired artifact. The determined process data is transferred from the voxel centers to the reconstructed three-dimensional model (mesh) of this sample and the locations of the defect zones are removed with subsequent closure with a uniform texture.

By finding the best angle on images containing fractal information, the fractal analysis data is transferred to the three-dimensional model. After performing all steps of the algorithm, we obtain a three-dimensional model with the transferred fractal analysis data from two-dimensional images. At the same time, the three-dimensional model identifies surface areas containing cracks/inclusions/inclusions that may affect the quality of industrial amber products processing and more accurately calculating the next steps for amber processing. All this is the basis for assessing the quality and increasing the competitiveness of industrial amber products.

**Keywords:** three-dimensional model; amber sample; fractal analysis; process removal; voxel; image sequence; surface quality.

Стаття надійшла до редакції 02.01.2026.