

УДК 528.721.287:537.533.35

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОРЕЛЬЄФУ ПОВЕРХОНЬ ОБ'ЄКТІВ МАТЕМАТИЧНИМИ МЕТОДАМИ ЗА ВИМІРАМИ ЇХНІХ ЦИФРОВИХ РЕМ-СТЕРЕОЗОБРАЖЕНЬ

О. Іванчук

Національний університет "Львівська політехніка"

Ключові слова: растровий електронний мікроскоп (РЕМ), математичне моделювання мікроповерхонь об'єктів, цифрові РЕМ-зображення.

Постановка проблеми і аналіз останніх досліджень та публікацій, що стосуються вирішення цієї проблеми

Сучасна високотехнологічна індустрія виробництва у машинобудуванні, мікроелектроніці, літакобудуванні, ракетно-космічній галузі та в багатьох інших потребують високоточної кількісної інформації про метричні параметри мікроповерхонь різноманітних деталей і механізмів, які можна отримати з високою точністю методами РЕМ-стереофотограмметрії. Для отримання параметрів мікрорельєфу цих поверхонь з необхідною точністю важливим є правильний вибір математичної моделі під час побудови їх ЦММР, які б були найнаближенішими до реальної мікроповерхні. Вибір математичних методів, які б оптимально моделювали мікроповерхню, залежить від багатьох факторів, зокрема, від характеру самої поверхні, параметрів РЕМ-зображень та інших.

Дослідженнями проблематики пошуку оптимальних методів математичного моделювання рельєфу земної поверхні займалися і продовжують займатися відомі вчені в Україні та за кордоном, зокрема І. Г. Черваньов, О. В. Поздняков, Л. Г. Руденко, Б. К. Малявський, О. О. Жарновський, І. Г. Журкін, Х. В. Бурштинська [1–6], Р. М. Рудий [16], Г. А. Шинкаренко, О. В. Бойко, О. С. Заяць [2, 4], Z. Miller, R. Torlegard, M. Baranowski, R. Finsterwalder та інші. Першим в Україні взявся за вирішення проблем математичного моделювання мікрорельєфу поверхонь на мікронному і субмікронному рівнях за їхніми РЕМ-стереозображеннями і продовжує сьогодні успішно їх проводити в Україні професор В. М. Мельник [9–13, 17–19]. Над цією проблематикою також працювали О. В. Разгуліна, В. М. Соколов, Д. І. Юрковець (усі МНУ ім. М. Д. Ломоносова, Росія) [17–19], А. В. Шостак, В. У. Волошин, Ю. В. Мельник [11, 14, 20–25] та інші.

Невирішені частини загальної проблеми

У теорії моделювання рельєфу земної поверхні математичні методи, що застосовуються при цьому, умовно поділяють на дві групи [6]: до першої групи належать методи, які ґрунтуються на різноманітних аналітичних функціях (степеневих і ортогональних поліномах, сплайнах, радіальних базисних функціях, триангуляції, скінченних елементах, R-функціях, рядах Фур'є тощо), а до другої групи – методи, які враховують статистичні характеристики рельєфу

(Крайгінга, середнього вагового, вагових функцій, випадкових функцій, колокації тощо). Встановлено [6], що найкращі результати моделювання отримано за використання обох груп методів, коли систематична складова вилучається за допомогою аналітичних функцій, а у відмітки точок вводяться поправки, які встановлюються на основі статистичних методів. Для побудови цифрових моделей мікрорельєфу (ЦММР) на мікронному рівні застосовувались лише декілька найвідоміших математичних методів, зокрема метод Крайгінга. Дослідження ефективності використання значно більшої кількості відомих методів у РЕМ-фотограмметрії для побудови ЦММР мікроповерхонь дослідних об'єктів і розглянуто у цій статті.

Постановка завдання

Використовуючи програмний пакет Surfer 10.0 та дані вимірів РЕМ-стереопар на ЦФС "Дельта" з програмним комплексом "Dimicros", побудувати цифрові моделі мікрорельєфу дослідних об'єктів – фрагментів поверхонь лесового ґрунту та металевих деталей різними методами математичного моделювання, оцінити їхню точність та дати рекомендації щодо доцільності та ефективності їх застосування.

Виклад основного матеріалу та результати досліджень

Вихідними матеріалами для досліджень були цифрові РЕМ-стереознімки мікроповерхонь:

а) лесового ґрунту (отримані на РЕМ Hitachi S-800 зі збільшенням $M = 1000^{\times}$);

б) поломки металеві деталі внаслідок механічного навантаження (отримані на вітчизняному РЕМ 1061 ВАТ "Selmi", м. Суми зі збільшенням $M = 42^{\times}$);

в) деформованої поверхні хромованої сталі (отримані на РЕМ JSM-710F фірми JEOL, Японія зі збільшенням $M = 750^{\times}$).

Усі РЕМ-стереопари отримані нормально-конвергентним випадком РЕМ-знімання: лівий знімок при $\alpha_l = 0^{\circ}$, правий – $\alpha_{np} = 8^{\circ}$ (рис. 1).

Вимірювання РЕМ-стереопар виконувались на цифровій фотограмметричній станції "Дельта" із застосуванням комплексу програм "Dimicros" і з урахуванням геометричних спотворень РЕМ-зображень, які були встановлені раніше. Вимірювання стереозображень виконувались рівномірно по всьому полю мікроповерхні у всіх її характерних точках за структурними елементами. Для різних мікроповерхонь вимірювалась різна кількість точок, зокрема для найскладнішого рельєфу мікроповерхні лесового ґрунту загалом виміряно 950 точок, з яких 850 вико-

ристовували для математичного моделювання мікроповерхні і створення ЦММР, а 100 – для оцінки точності використаного методу. На мікроповерхні зламу металу виміряно 500 точок, з яких для моделювання використано 450 і 50 для контролю. І на поверхні хромованої сталі виміряно 300 точок, з яких 250 використано для моделювання поверхні й 50 – для оцінки точності методу моделювання. Просторові умовні координати точок мікроповерхні X , Y , $Z(h)$ визначено за формулами нормально-конвергентного випадку РЕМ-знімання [7]. Початок просторових координат точок для кожної стереопари вибирали стереоскопічно в геометричному центрі лівого знімка, їм присвоєно нульові значення. Розміри ділянки знімання мікроповерхні лесового ґрунту становили приблизно 90×100 мкм. Перепад висот у межах ділянки близько 40 мкм. Для побудови ЦММР використано 14 основних математичних методів програмного пакета Surfer 10.0, зокрема:

- метод степеня зворотної віддалі (IDP);
- три різновиди методу Крайгінга (Kriging) з варіограмою лінійного виду і з урахуванням лінійного та квадратичного трендів поверхні;
- метод мінімальної кривизни (Minimum Curvature);
- методи натуральних (Natural Neighbor) і сусідніх (Nearest Neighbor) околів;
- метод радіально-базисних функцій з п'ятьма різними методами інтерполювання: зворотний мультиквадрик (Inverse Multiquadric), з використанням логарифмічної функції (Multilog), мультиквадриковий (Multiquadric), кубічного сплайна (Natural Cubic Spline) і т. зв. метод сплайна гнучкої пластини (Thin Plate Spline);
- триангуляції з лінійною інтерполяцією (Triangulation with Linear Interpolation);
- модифікований метод Шепарда (Modified Shepard's method).

Послідовність побудови ЦММР така: після вибору методу моделювання з заданого масиву координат точок (X , Y , Z) будувалась регулярна сітка з кроком приблизно 1 мкм (89×100 перехресть, розширення .grd). За регу-

лярною сіткою (ЦММР) надалі графічно будували плани мікроповерхонь в горизонталях і 3D-зображення мікроповерхні, наведені на рис. 4–6.

Оцінку точності побудови ЦММР виконували двічі: за висотами точок всього масиву вимірних точок і окремо за контрольними точками, тобто за різницями висот між вимірними координатами $Z(h)$ і отриманими висотами в результаті моделювання тим чи іншим методом. Теоретична точність отримання висот точок мікроповерхні за цих параметрів РЕМ-знімання становить:

- для мікроповерхні лесу – близько $m_{z, теор} = 1,0$ мкм;
- для мікроповерхні зламу металу – $m_{z, теор} = 0,1$ мм;
- для мікроповерхні хромованої сталі – $m_{z, теор} = 1,5$ мкм.

Побудовано 42 ЦММР чотирнадцятьма методами по три моделі для різних поверхонь кожним методом і виконано оцінку точності побудови для кожного з них.

У табл. 1 наведено результати оцінки точності моделювання лише мікроповерхні лесового ґрунту різними математичними методами, як поверхні з найскладнішим рельєфом. Для інших поверхонь ми задля економії обсягу тексту статті не наводимо кількісні результати досліджень, позаяк вони абсолютно корелюють з даними для мікроповерхні лесового ґрунту (пропорційно до точності отримання висот точок для цих поверхонь, яка залежить, насамперед, від збільшення РЕМ-зображення, кутів нахилу гоніометричного столика і точності вимірів, що для цифрових РЕМ-зображень становить 0,09375 мм, тобто дорівнює розміру 1 пікселя цифрового зображення). Наведені в табл. 1 дані дають змогу виконати об'єктивний аналіз ефективності й сформулювати рекомендації щодо доцільності використання досліджених математичних методів для моделювання рельєфу мікроповерхонь, які ми виклали у висновках.

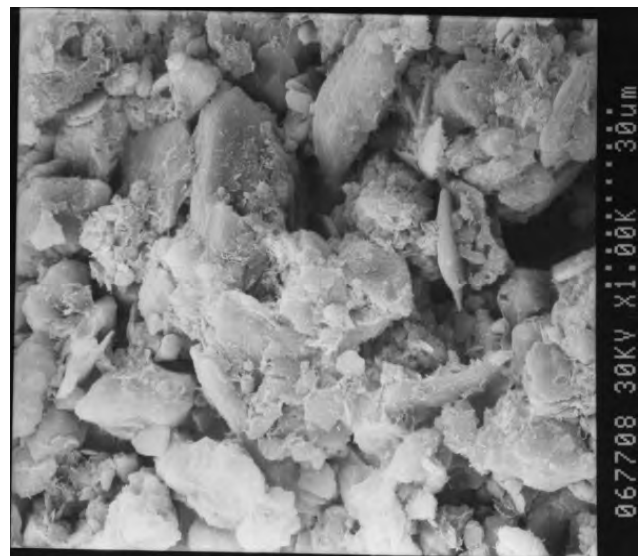


Рис. 1. Стереопара мікроповерхні лесового ґрунту, отримана на РЕМ "Hitachi" S-800 при $M = 1000\times$ і кутах нахилу гоніометричного столика $\alpha_n = 0^\circ$, $\alpha_n = +8^\circ$

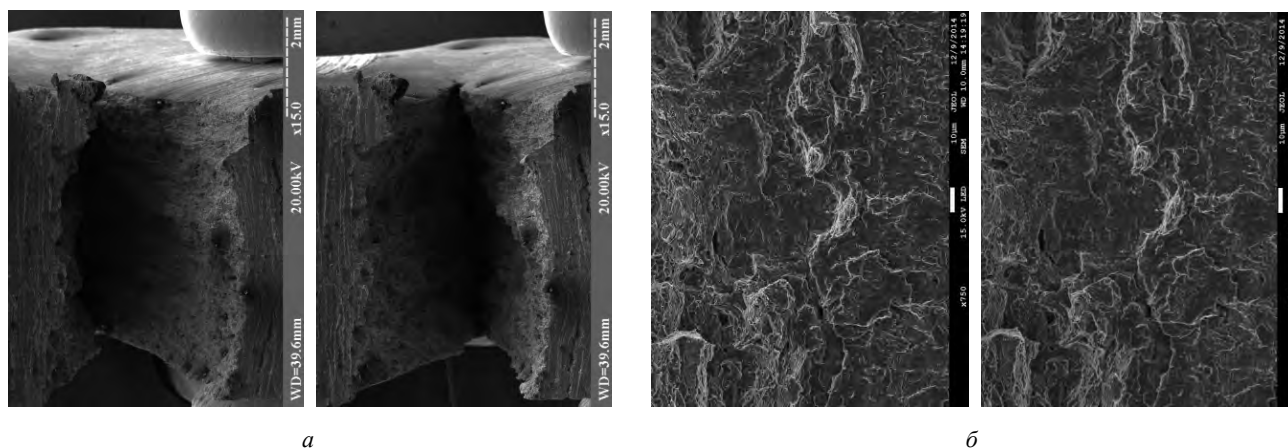


Рис. 2. Стереопари: а – мікроповерхні зламу металу (PEM 106I, $M=42,7^x$, $\alpha_l = -6^\circ$, $\alpha_n = +6^\circ$); б – мікроповерхні хромованої сталі (PEM JSM-7100F, $M=750^x$, $\alpha_l = 0^\circ$, $\alpha_n = +8^\circ$)

Таблиця 1

Результати оцінки точності моделювання мікроповерхні лесового ґрунту різними математичними методами

№	Метод моделювання	К-ть точ. модел. контр.	ΔZ_{\min} , мкм	ΔZ_{\max} , мкм	Середнє арифмет. відхил. $\sum \Delta Z/n$, мкм	Середнє квадрат. відхил. $m_{\Delta Z}$, мкм
1	Обернено пропорційний до відстані у степені Inverse Distance to a Power	850	-2,6	2,5	0,014	0,86
		100	-4,9	2,2	0,318	1,30
2	Крайгінга (лінійна варіограма) Kriging (linear variogram model)	850	-2,0	2,1	-0,013	0,56
		100	-1,7	2,5	-0,058	0,84
3	Крайгінга (лінійна варіограма+ лін. тренд) Kriging (linear variogram + linear drift)	850	-2,0	2,1	-0,013	0,56
		100	-1,7	2,5	-0,057	0,84
4	Крайгінга (лінійна варіограма+квадр. тренд) Kriging (linear variogram + quadratic drift)	850	-2,0	2,1	-0,015	0,56
		100	-1,7	2,5	-0,046	0,86
5	Мінімальної кривизни Minimum Curvature	850	-2,1	3,0	0,008	0,54
		100	-2,8	3,0	-0,094	1,14
6	Природних околів Natural Neighbor	850	-4,5	4,1	0,035	0,71
		100	-1,5	1,2	-0,041	0,65
7	Сусідніх околів Nearest Neighbor	850	-1,8	2,4	0,014	0,27
		100	-3,6	3,6	-0,005	1,18
8	Радіально-базисних функцій RBF (Inverse Multiquadric)	850	-2,0	1,6	-0,007	0,53
		100	-2,2	1,5	0,035	0,71
9	Радіально-базисних функцій RBF (Multilog)	850	-1,4	1,4	-0,010	0,36
		100	-1,4	1,6	-0,079	0,73
10	Радіально-базисних функцій RBF (Multiquadric)	850	-1,2	1,1	-0,015	0,27
		100	-2,0	2,2	-0,114	0,89
11	Радіально-базисних функцій RBF (Natural Cubic Spline)	850	-1,0	0,8	-0,023	0,20
		100	-2,3	1,5	-0,311	0,95
12	Радіально-базисних функцій RBF (Thin Plate Spline)	850	-1,0	0,9	-0,020	0,23
		100	-2,0	1,7	-0,189	0,78
13	Триангуляції з лінійною інтерпол. (Triangulation with Linear Interpolation)	850	-2,3	2,3	-0,036	0,78
		100	-2,0	1,5	-0,083	0,74
14	Шепарда (модифікований) Modification Sheppard's Method	850	-1,4	1,1	-0,024	0,24
		100	-5,9	4,5	-0,420	1,76

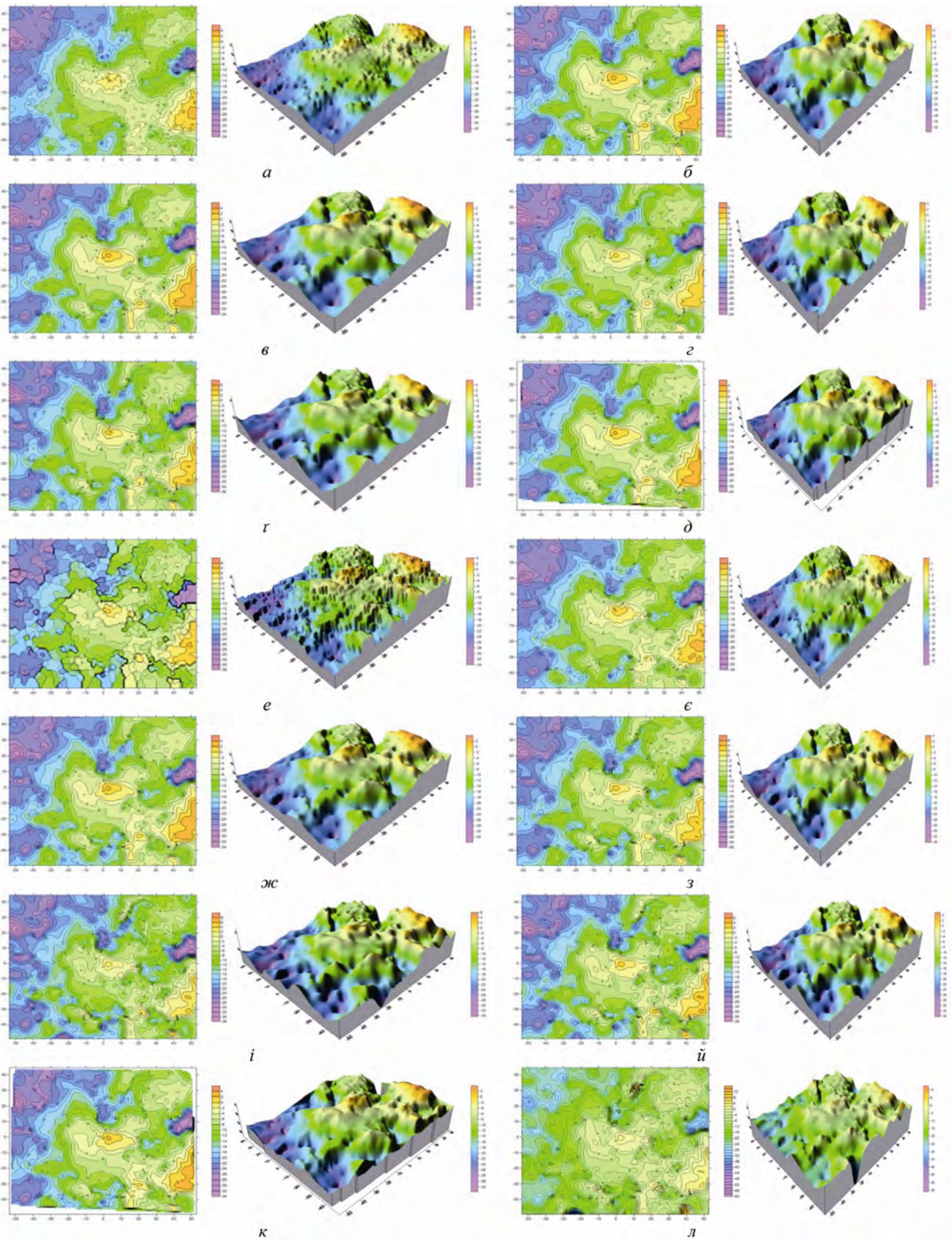


Рис. 3. Приклади графічного представлення мікроповерхні лесового ґрунту у вигляді мікропланів та 3D-моделей, побудованими різними математичними методами за 850 вимірними точками:
 а – обернено пропорційний до відстані у степені; б – Крайгінга (лінійна варіограма); в – Крайгінга (лін. вар. + врах. лін. тренду); г – Крайгінга (лін. вар. + врах. квадратич. тренду); г – мінімальної кривизни; д – природних околів; е – сусідніх околів; е – радіальних базисних функцій (РБФ), зворотн. мультіквадр; жс – РБФ, мультілогарифмічний метод інтерполювання; з – РБФ, мультіквадратиковий; і – РБФ, кубічний сплайн; й – РБФ, сплайна гнучкої пластини; к – триангуляції з лінійною інтерполяцією; л – Шепарда (модифікований)

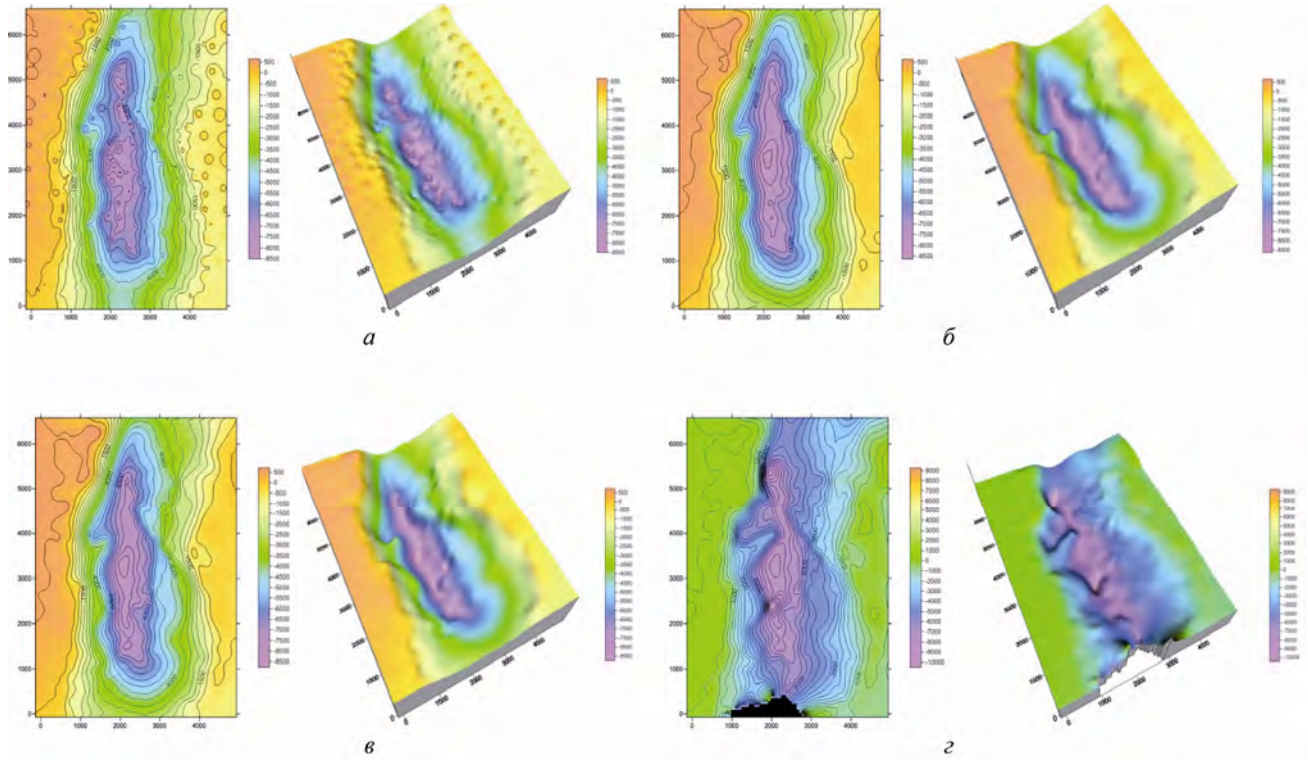


Рис. 4. Приклади графічного представлення мікроповерхні зламу металу у вигляді мікропланів та 3D-моделей, побудованих різними математичними методами за 450 вимірними точками: а – обернено пропорційний до відстані у степені; б – Крайгінга (лінійна варіограма); в – РБФ, мультиквадриковий; г – Шепарда (модифікований)

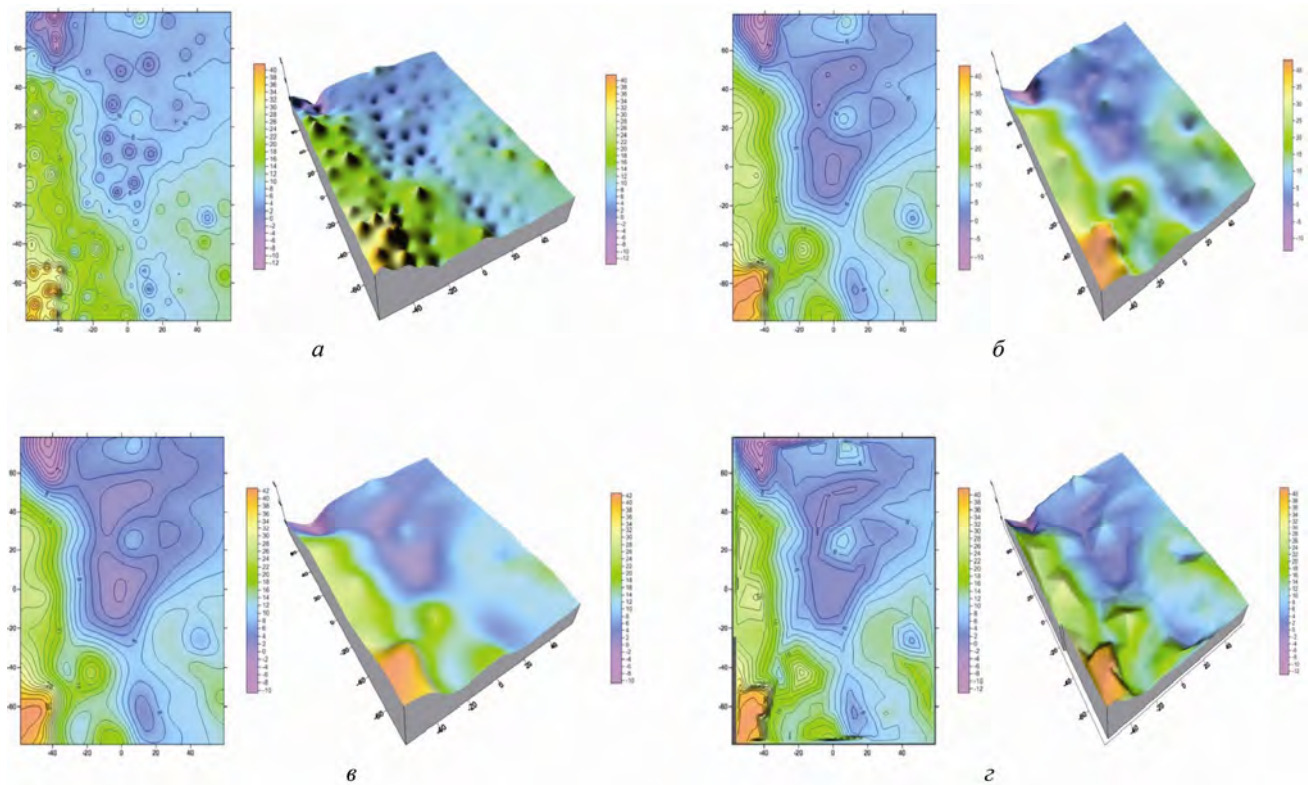


Рис. 5. Приклади графічного представлення мікроповерхні хромованої сталі у вигляді мікропланів та 3D-моделей, побудованих різними математичними методами за 250 вимірними точками: а – обернено пропорційний до відстані у степені; б – Крайгінга (лінійна варіограма); в – РБФ, мультиквадриковий; г – триангуляції з лінійною інтерполяцією

За результатами досліджень можна зробити певні висновки.

Висновки

1. Виконані дослідження показали можливість використання для ефективного моделювання мікрорельєфу поверхонь дослідних об'єктів (грунти, метали, кераміка тощо) математичних методів, реалізованих у програмному пакеті Surfer 10.0, який сьогодні є загальнодоступним.

2. З 14 досліджених методів чотири методи виявились не зовсім придатними для побудови ЦММР з необхідною точністю ($m_z \leq 1.0$ мкм) за заданої достатньо значної кількості вимірних точок (850) для поверхні лесового ґрунту. Зокрема, це методи Шепарда, обернено пропорційний до відстані у степені, сусідніх околів і мінімальної кривизни.

3. Найкращі результати отримано методами Крайгінга, радіальних базисних функцій, природних околів та триангуляції з лінійною інтерполяцією. Що стосується методу Крайгінга, то можливості його застосування набагато ширші й універсальніші від решти перелічених, оскільки в разі його використання можна використовувати різні типи варіограм (лінійну, експоненційну, квадратичну й інші функції), а також враховувати тип тренду поверхні, різну кількість точок для моделювання в октанті й тим самим дещо підвищувати точність цифрового моделювання мікрорельєфу.

4. Вибір найоптимальніших з великої кількості математичних методів цифрового моделювання мікрорельєфу залежить від багатьох факторів (типу та структури поверхні об'єкта, матеріалу, з якого він виготовлений, параметрів РЕМ-знімання, кількості вимірних характерних точок мікроповерхні тощо) і потребує для кожного випадку окремих експериментальних досліджень.

5. Оптимальною кількістю точок для складного типу рельєфу мікроповерхні лесу площею близько 10000 мкм² є 500–1000 точок, які необхідно набирати нерегулярно в усіх характерних місцях (вздовж структурних ліній, вершини, западини, уступи тощо). Важливо під час вимірювання точок їх не дублювати, оскільки деякі методи, зокрема метод радіальних базисних функцій, дуже чутливий до цього фактора і під час моделювання в околах таких подвійних точок отримуємо сильно спотворені висоти точок регулярної сітки, так звані "піки".

6. Для стереоскопічного вимірювання 800–1000 точок складного типу мікрорельєфу з перепадом висот до 50 мкм ($M = 1000^x$) необхідно близько 2 годин, якщо вимірювання РЕМ-стереопар виконувати на ЦФС "Дельта" з використанням спеціального пакета програм "Dimicros".

Література

- Бурштинська Х. В. Порівняльний аналіз побудови цифрових моделей рельєфу з використанням апроксимаційних функцій / Бурштинська Х. В. // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2001. – Вип. 61. – С. 137–148.
- Бурштинська Х. В. Моделювання рельєфу із застосуванням диференціальних сплайнів / Бурштинська Х. В., Заяць О. С. // Матеріали VI Міжн. наук.-техн. симпоз. "Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища, GPS та GIS-технології". – Алушта, 2001. – С. 66–68.
- Бурштинська Х. В. Колокація з умовами у цифровому моделюванні рельєфу / Бурштинська Х. В. // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2002. – Вип. 62. – С. 103–110.
- Бурштинська Х. В. Теоретичні основи та експериментальні дослідження математичних функцій для побудови цифрових моделей рельєфу / Бурштинська Х. В., Заяць О. С. // Вісник геодезії і картографії. – 2002. – № 4. – С. 32–37.
- Бурштинська Х. В. Основні чинники впливу на точність побудови цифрових моделей рельєфу / Бурштинська Х. В. // Матеріали VII Міжн. наук.-техн. симпоз. "Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища, GPS та GIS-технології". – Алушта, 2002. – С. 10–17.
- Бурштинська Х. В. Теоретичні та методологічні основи цифрового моделювання рельєфу за фотограмметричними та картометричними даними: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Бурштинська Х. В. – Львів, 2003. – 36 с.
- Іванчук О. М. Методи оперативного фотограмметричного опрацювання знімків, отриманих на растрових електронних мікроскопах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Іванчук О. М. – Львів, 2000. – 18 с.
- Іванчук О. М. Дослідження точності побудови цифрових моделей мікрорельєфу різними математичними методами за вимірами РЕМ-стереопар поверхні лесового ґрунту / Іванчук О. М. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2008. – Вип. II(16). – С. 111–116.
- Мельник В. Н. Математическое моделирование микрорельефа шероховатых поверхностей / Мельник В. Н., Шебашинов М. П., Крестьянов В. И. // ППО, 1991. – № 1. – С. 26–29.
- Мельник В. М. Теорія і практика фотограмметричних методів в електронно-мікроскопічних дослідженнях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Мельник В. М. – Львів, 1995. – 51 с.
- Мельник В. М. Стереолого-планіметрична обробка РЕМ-зображень методом Кригінга / Мельник В. М., Волошин В. У. // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів, 2003. – С. 155–162.
- Мельник В. М. Растрово-електронна стереомікрофрактографія: монографія / Мельник В. М., Шостак А. В. – Луцьк, 2009. – 469 с.
- Мельник В. М. Кількісна стереомікрофрактографія: монографія / Мельник В. М., Шостак А. В. – Луцьк, ПВД "Твердиня", 2010. – 460 с.
- Мельник Ю. А. Визначення структури та мікропографії характеристичних поверхонь матеріалів методом 3D реконструкції: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Мельник Ю. А. – Луцьк, 2013. – 20 с.
- Ріпецький Є. Дослідження кінетики розвитку втомних тріщин металу на основі цифрової

- 3D-моделі / Ріпецький Є., Рибак Т., Іванчук О. // Вісник Тернопільського технічного університету. – Тернопіль, 2013. – № 2 (70). – С. 114–120.
16. Рудий Р. М. Методи дослідження рельєфу земної поверхні: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Рудий Р. М. – Львів, 1999. – 38 с.
 17. Соколов В. Н. Метод количественного анализа микроструктуры твердых тел по их РЭМ-изображениям / Соколов В. Н., Юрковец Д. И., Разгулина О. В., Мельник В. Н. // Зав. лаб., 1997. – № 9. – Т. 63. – С. 5–35.
 18. Соколов В. Н. Автоматизированная система морфологического анализа скелетного компонента микроструктуры по РЭМ-изображениям / Соколов В. Н., Юрковец Д. И., Разгулина О. В., Мельник В. Н. // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования, 2002. – № 10. – С. 66–69.
 19. Соколов В. Н. Метод оценки округлостей микрообъектов по РЭМ-изображениям / Соколов В. Н., Юрковец Д. И., Разгулина О. В., Мельник В. Н. // Изв. РАН. Сер. физическая, 2005. – Т. 69. – № 4. – С. 533–536.
 20. Шостак А. В. Деякі питання фотограмметричного моделювання фрактографічних поверхонь / Шостак А. В., Іванчук О. М. // Геодезія, картографія та аерофотознімання. – Львів, 1999. – № 59. – С. 89–94.
 21. Шостак А. В. Комп'ютерне тривимірне моделювання зламів / Шостак А. В., Іванчук О. М. // Міжн. журнал ФХММ. – Львів, 2000. – № 1. – С. 107–110.
 22. Шостак А. В. Моделювання мікрорельєфу фрактографічних поверхонь методом триангулятора і скінченних елементів / Шостак А. В. // Наук. нотатки. – Луцьк, 2001. – Вип. 8. – С. 285–291.
 23. Шостак А. В. Аналіз в РЕМ механічно сформованих поверхонь методом структурної функції / Шостак А. В. // Наук. нотатки. – Луцьк, 2003. – Вип. 13. – С. 386–393.
 24. Шостак А. В. Визначення методами Фур'є-Хартлі мікротопографічних параметрів фрактографічних поверхонь / Шостак А. В., Мельник Ю. А. // Наук. вісник ВНУ ім. Лесі Українки. – Луцьк, 2012. – С. 68–76.
 25. Шостак А. В. Методи і моделі мікрофотограмметрії у прикладних наукових дослідженнях: автореф. дис... д-ра техн. наук : 05.24.01 / Шостак А. В.; Луцький нац. техн. університет. – Київ, 2012. – 28 с.

Дослідження точності моделювання мікрорельєфу поверхонь об'єктів математичними методами за вимірами їхніх цифрових РЕМ-стереозображень
О. Іванчук

Наведено результати досліджень точності моделювання мікрорельєфу поверхонь дослідних об'єктів (лесового ґрунту, зламу металу, хромованої сталі) різними математичними методами в програмному середовищі Surfer 10.0. Для створення ЦММР поверхонь

застосовано 14 різних математичних методів. Вихідними даними для цифрового математичного моделювання були просторові координати точок мікроповерхонь об'єктів, отримані за результатами вимірів цифрових РЕМ-стереозображень з урахуванням їхніх геометричних спотворень. Встановлено доцільність використання для побудови ЦММР мікроповерхонь об'єктів методів Крайгінга, радіальних базисних функцій, природних околів та триангуляції з лінійною інтерполяцією. Методи Шепарда, обернено пропорційний до відстані у степені, сусідніх околів та мінімальної кривизни дають подекуди у два–три рази нижчу точність побудови ЦММР, тому їх використання недоцільне.

Исследования точности моделирования микрорельефа поверхностей объектов математическими методами за измерениями их цифровых РЭМ-стереоизображений
О. Иванчук

Приведены результаты исследований точности моделирования микрорельефа поверхностей исследовательских объектов (лессового грунта, излома металла, хромированной стали) различными математическими методами в программной среде Surfer 10.0. Для создания ЦММР поверхностей применено 14 различных математических методов. Исходными данными для цифрового математического моделирования были пространственные координаты точек микроповерхностей объектов, полученные по результатам измерений цифровых РЭМ-стереоизображений с учетом их геометрических искажений. Установлена целесообразность использования для построения ЦММР микроповерхностей объектов методов Крайгинга, радиальных базисных функций, естественных соседей и триангуляции с линейной интерполяцией. Методы Шепарда, обратно пропорциональный расстоянию в степени, соседних окрестностей и минимальной кривизны дают иногда в два–три раза ниже точность построения ЦММР, поэтому их использование нецелесообразно.

Research simulation accuracy microrelief surfaces of objects mathematical methods for measuring their digital stereo SEM
O. Ivanchuk

The results of investigations precision simulation research microrelief surfaces of objects (loess soil, scrapping metal, chrome steel) in various mathematical methods in the software environment Surfer 10.0. To create TSMMP surfaces used 14 different mathematical methods. The initial data for mathematical modeling of digital spatial coordinates were microrelief surfaces of objects obtained by measuring SEM-digital stereo view of their geometric distortion. Established the feasibility of using to build TSMMP microrelief surfaces of objects methods Kriging, radial basis function, natural neighbor and triangulation with linear interpolation. Methods modified Shepard, inverse distance to the power, nearest neighbor and minimum curvature sometimes 2–3 times lower accuracy TSMMP building, so their inappropriate use.