

О. М. ІВАНЧУК^{1*}, О. В. ТУМСЬКА²^{1*}Каф. «Фотограмметрії та геоінформатики», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел. +38(068)0720575, ел. пошта: ivanchuk_oleh@ukr.net²Каф. «Фотограмметрії та геоінформатики», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел. +38(050)7455711, ел. пошта: ol.tums@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ФРАКТАЛЬНИХ ТА МЕТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДАНИМИ ВИМІРЮВАНЬ РІЗНОМАСШТАБНИХ ЦИФРОВИХ РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ ТЕСТ-ОБ'ЄКТА, ОТРИМАНИХ НА РІЗНИХ ТИПАХ РЕМ

Мета. Метою цієї роботи є встановлення та дослідження фрактальних та метричних характеристик зображень, отриманих за допомогою растрових електронних мікроскопів (РЕМ). **Методика.** Дослідження ґрунтуються на опрацюванні даних вимірювань цифрових РЕМ-зображень тест-об'єкта, отриманих на чотирьох типах сучасних РЕМ у діапазоні збільшень від $1000\times$ до $30000\times$ (крат). **Результати.** Встановлено аналітичне співвідношення між фіксованим на шкалі приладу і “фрактальним” збільшенням (масштабом). Виконано розрахунок коефіцієнтів подібності A_f та експоненціальних показників D_f для фрактальних збільшень (масштабів) уздовж осей x та y для 4-х типів РЕМ. Отримано і наведено формули для розрахунку можливого діапазону збільшень зображень тест-об'єкта залежно від кроку тест-об'єкта, розміру пікселя та масштабу. Отримані співвідношення для обчислення фрактальних масштабів дають змогу автоматично визначити дійсне збільшення (масштаб) РЕМ-зображень і разом з визначеними коефіцієнтами поліномів ефективно усувають їхні дисторсійні спотворення. **Наукова новизна.** Розроблена авторами методика отримання фрактальних та метричних характеристик РЕМ-зображень виконана вперше в Україні. Запропонована методика супроводжується на всіх її етапах авторським програмним забезпеченням і показала свою ефективність та доцільність. **Практична значущість.** Застосування цієї методики встановлення та врахування фрактальних і метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень дає змогу з більшою точністю визначати дійсні значення збільшень (масштабів) цифрових РЕМ-зображень та величини їхніх геометричних спотворень. Врахування цих характеристик РЕМ-зображень дає змогу суттєво підвищити точність отримання просторових кількісних параметрів мікроповерхонь дослідних об'єктів, а, отже, покращити їхні експлуатаційні та економічні характеристики. Отримані характеристики можуть бути додатковими важливими кількісними параметрами для виявлення особливостей цифрових РЕМ зображень.

Ключові слова: растровий електронний мікроскоп (РЕМ); тест-об'єкт; цифрове РЕМ-зображення; фрактальні та метричні властивості цифрових РЕМ-зображень; дійсні збільшення (масштаби), геометричні спотворення цифрових РЕМ-зображень.

Вступ

Калібрування цифрових РЕМ-зображень, тобто встановлення їх дійсних масштабів і геометричних спотворень є важливою технологічною ланкою у процесі фотограмметричного опрацювання РЕМ-стереопар дослідних об'єктів для встановлення їх просторових кількісних характеристик з необхідною точністю.

Проблемам визначення дійсних масштабів РЕМ-зображень, їх геометричних спотворень та їх врахування з часу створення перших РЕМ і до появи РЕМ з цифровим записом зображення приділялось багато уваги. І ці проблеми на сьогодні практично вирішені. В їх основі лежить методика калібрування РЕМ на підставі фотограмметричного опрацювання РЕМ-зображень спеціальних тест-об'єктів зі строго еталонними характеристиками їх роздільної здатності (тест-сітки, голографічні

решітки, тощо). Найбільш важливі публікації з цієї проблематики приведені нами у переліку літературних джерел [5-17, 26-28, 30-32].

Однак питанням досліджень РЕМ-зображень різних масштабів з точки зору їх можливої фрактальної природи, а також отримання різноманітних числових характеристик, які б підтвердили чи спростували думку про те, що РЕМ-зображенням притаманні ще й властивості скейлінга, тобто масштабної інваріантності або самоподібності, присвячено небагато робіт.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, присвячених розв'язанню цієї проблеми

Принципи фрактальної геометрії в практиці РЕМ-стереофотограмметрії вперше застосовано для досліджень мікроструктури ґрунтів Мельником В. М. і Соколовим В. М. [18, 20]. Принципи фрактальності

використовувались також у дослідженнях механіки руйнування металів за РЕМ-зображеннями їх мікроповерхонь [2, 19]. Метод фрактального аналізу застосований Мельником В. М. і Волошиним В. У. для оцінки деструктивних змін кісткової тканини тварин внаслідок їх радіаційного опромінення [21]. Теоретичні і практичні результати використання принципів і теоретичних положень фрактальної геометрії при опрацюванні РЕМ-зображень різних мікроповерхонь узагальнені і викладені у монографії Мельника В. М. і Шостак А. В. [22, 25]. Однак робіт, які би використовували дані підходи для досліджень метричних характеристик РЕМ-зображень, автори не зустрічали.

Виклад основного матеріалу та результати досліджень

Стохастичний характер процесу отримання РЕМ-зображень (струм вторинних електронів) та випадкові значення інтенсивності (рівнів сірого тону) можна вважати причиною фрактальної природи РЕМ-зображень. Нами підмічено, що для різних збільшень РЕМ-зображення мають властивість *скейлінга*, тобто масштабну інваріантність або самоподібність. Оскільки дійсні збільшення (масштаби) РЕМ-зображення вздовж осей x та y внаслідок різного роду спотворень в процесі його формування, як правило, дещо відмінні між собою, то можна вважати, що вони є самоафінними, а не самоподібними, [Федер, [24]]. Різномасштабні РЕМ-зображення можна віднести до типу статистично подібних фрактальних множин, які ґрунтуються на понятті метричної розмірності, що строго більше топологічної розмірності [Анищенко, [1]]. Прикладом природніх фракталів такого типу є фрагмент берегової лінії [Richardson, [34]].

Як показано в роботах Іванчука О. М. [5÷11] значення дійсних масштабів РЕМ-зображень є нецілими і відрізняються від встановлених на шкалі приладу. Збільшення РЕМ-зображення M_x і M_y визначаються за 8 вимірними центрами вузлів тест-об'єкта (тест-сітки) в центральній частині знімка (див. фото у табл. 3). Значення відстаней обчислюються за координатами центрів вузлів в масштабі збільшення. Дійсні масштаби

визначаються як середнє значення відношень відстаней між центрами вузлів в масштабі збільшення до відповідних відстаней між вузлами тест-об'єкта.

В результаті отримані експериментальні значення серій дійсних масштабів для різних РЕМ у діапазонах фіксованих значень збільшень, встановлених на шкалі приладу [5÷11]:

- 1000^x, 2000^x, 5000^x, 8000^x, 10000^x, 15000^x, 20000^x, 24000^x, 27000^x, 30000^x для РЕМ JCM-5000 (NeoScope), (JEOL, Японія);
- 2000^x, 5000^x, 7500^x, 10000^x, 15000^x, 20000^x, 25000^x, 30000^x для РЕМ JSM 7100F (JEOL, Японія);
- 1000^x, 2000^x, 3000^x, 5000^x, 10000^x, 20000^x для РЕМ DSM-960A (Zeiss, Німеччина);
- 1000^x, 2500^x, 5000^x, 8000^x, 10000^x, 15000^x, 20000^x, 25000^x для РЕМ 106I (Суми, Україна).

Основні технічні характеристики РЕМ, за допомогою яких отримані цифрові РЕМ-зображення тест-сітки приведені у таблиці 1.

Аналіз отриманих результатів показує, що при зміні масштабу відстані між вузлами тест-сітки не змінюються строго пропорційно масштавному відношенню, встановленому на шкалі приладу, а збільшуються у нецілу кількість разів. Тому було прийнято допущення про фрактальну природу збільшень РЕМ-зображень. На основі емпіричного співвідношення [Richardson, [34]] авторами встановлено масштабне співвідношення між фіксованим на шкалі приладу цілочисельним масштабом M і «фрактальним» масштабом M_f [Іванчук, Тумська, [12]]

$$M_f = A_f \cdot M^{2-D_f} \quad (1)$$

де A_f – коефіцієнт пропорційності; D_f – експоненціальний показник. Обчислений за формулою (1) масштаб M_f будемо називати *фрактальним* масштабом. Якщо крок істинної тест-сітки позначимо як r , то при збільшенні у M разів дійсна довжина кроку, згідно (1), дорівнює

$$M_f \cdot r = A_f \cdot (M \cdot r) \cdot M^{1-D} \quad (2)$$

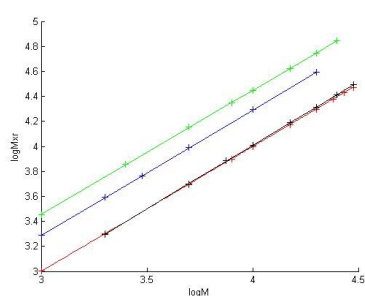
В роботі [Mandelbrot, 1983] показано, що величина D представляє фрактальну розмірність.

Основні технічні характеристики PEM і цифрових PEM-зображень

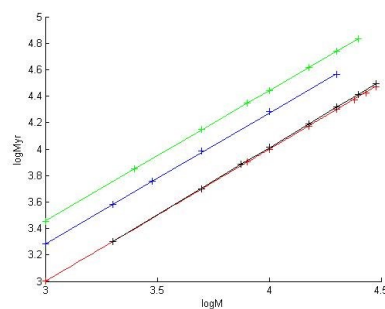
	JCM-5000 (NeoScope)	JSM 7100F	DSM-960A	PEM 106 I
Режим роботи	високовакуумний	високовакуумний	високовакуумний	високовакуумний
Прискорююча напруга	від 5 до 15 кВ	від 0,5 до 40 кВ	від 1 до 30 кВ	від 0,5 до 30 кВ
Діапазон збільшень	від 10^x до 40000^x	від 10^x до 300000^x	від 10^x до 100000^x	від 15^x до 300000^x
Макс. розмір зразка мм	діам. до 70, h до 50	діам. до 70, h до 50	діам. до 70, h до 50	діам. до 50, h до 30
Макс. розділ. здатність	10 нм	1,2 нм	5 нм	2 нм
Розгортка, пікселів	1280x1080	1280x1024	800x600	1280x960
Розмір пікселя, мм	0,09132	0,09375	0,13698	0,09375
Розм. пікс. при вимірах	0,09132	0,09375	0,26450	0,26450
Коеф. перех. до М факт	1,0	1,0	1,9310	2,8213
Розмір PEM-знімка, мм	116,9x98,6	120,0x96,0	211,6x158,7	338,6x253,9
Формат запису файлів	JPEG, TIFF	BMP, JPEG, TIFF	JPEG, TIFF	BMP
Об'єм PEM-знімка, Мб	1,32	1,25	0,47	1,17

Величини A_f та D_f визначимо за набором пар значень цілих і дійсних масштабів (M , M_{xr}), (M , M_{yr}) вздовж осей x і y відповідно. На рис. 1 для різних типів PEM наведено графіки

залежностей величин $\log M \rightarrow \log M_{xr}$ та $\log M \rightarrow \log M_{yr}$, які представляють пряму лінію.



а)



б)

Рис. 1. Графіки залежностей $\log M \rightarrow \log M_{xr}$ (а) та $\log M \rightarrow \log M_{yr}$ (б) для JCM-5000 (червоний), JSM 7100F (чорний), DSM-960 A (синій), PEM 106 I (зелений)

Зауважимо, що графіки для JCM-5000 та JSM 7100F майже співпадають, а графіки для DSM-960A та PEM 106I (Суми) зсунуті по логарифмічній осі y на величини 0,3 та 0,45 і відповідно відрізняються від масштабів, встановлених на шкалі приладу, приблизно у 2 та в 3 рази. Параметри прямих (рис.1) визначимо з рівнянь регресії.

Побудова прямої регресії. Підставляючи у рівняння (1) замість M_f відомі значення M_r , після логарифмування, маємо

$$\lg M_r = \lg A_f + (2 - D_f) \cdot \lg M. \quad (3)$$

Якщо позначити

$$x = \lg M, \quad y = -\lg M_r, \quad A = 2 - D_f, \quad C = \lg A_f, \quad (4)$$

то отримаємо рівняння прямої $Ax + By + C = 0$. Визначаємо параметри

прямої як такі, що мінімізують суму квадратів відстаней за перпендикуляром між множиною точок (x_i, y_i) і прямою [Cromley, 1992]:

$$\min \sum_{i=1}^N (s_i)^2, \quad (5)$$

де $s_i = |Ax_i + By_i + C|$ - відстань між i -ою точкою і прямою. Якщо $A^2 + B^2 = 1$, то s_i - вимірює відстань за перпендикуляром між точкою і прямою.

Задача мінімізації загальної перпендикулярної відстані між множиною точок і прямою полягає у знаходженні мінімуму функції:

$$\sum_{i=1}^N (Ax_i + By_i + C)^2, \quad (6)$$

$$\text{за умови} \quad A^2 + B^2 = 1. \quad (7)$$

Ця задача може бути переписана у формі лагранжіана:

$$\min \sum_{i=1}^N (Ax_i + By_i + C)^2 - \lambda(1 - A^2 - B^2), \quad (8)$$

де λ - множник Лагранжа, пов'язаний з рівнянням (7). Розв'язок нормальних рівнянь для (8) дає

$$A = \frac{q - (q^2 + 4t^2)^{1/2}}{2t} B \text{ і } C = -A\bar{x} - B\bar{y},$$

$$\text{де } q = \left(\sum_{i=1}^N x_i'^2 - \sum_{i=1}^N y_i'^2 \right) \text{ і } t = \sum_{i=1}^N x_i' y_i',$$

(9)

x_i', y_i' - координати точки відносно середнього центру з координатами $\bar{x}, \bar{y}$.

Звідси знайдемо параметри рівняння (1)

$$A_f = 10^C, D_f = 2 - A_f \quad (10)$$

відповідно для масштабів M_{xf} вздовж осі x та M_{yf} вздовж осі y .

За наведеним алгоритмом у системі MatLab виконано розрахунок коефіцієнтів A_f та показників степенів D_f для фрактальних масштабів вздовж осей x та y (табл. 2) [Гонсалес, 2006]. Для обчислень використано виміряні значення дійсних масштабів для 4-х типів РЕМ. Відзначимо, що зображення тест-об'єкта в різних масштабах, отриманих на одному РЕМ мають однакові коефіцієнти A_f та розмірність D_f у заданому діапазоні збільшень.

Результати обчислень для 4-х типів РЕМ проілюстровано графічно на рис. 2.

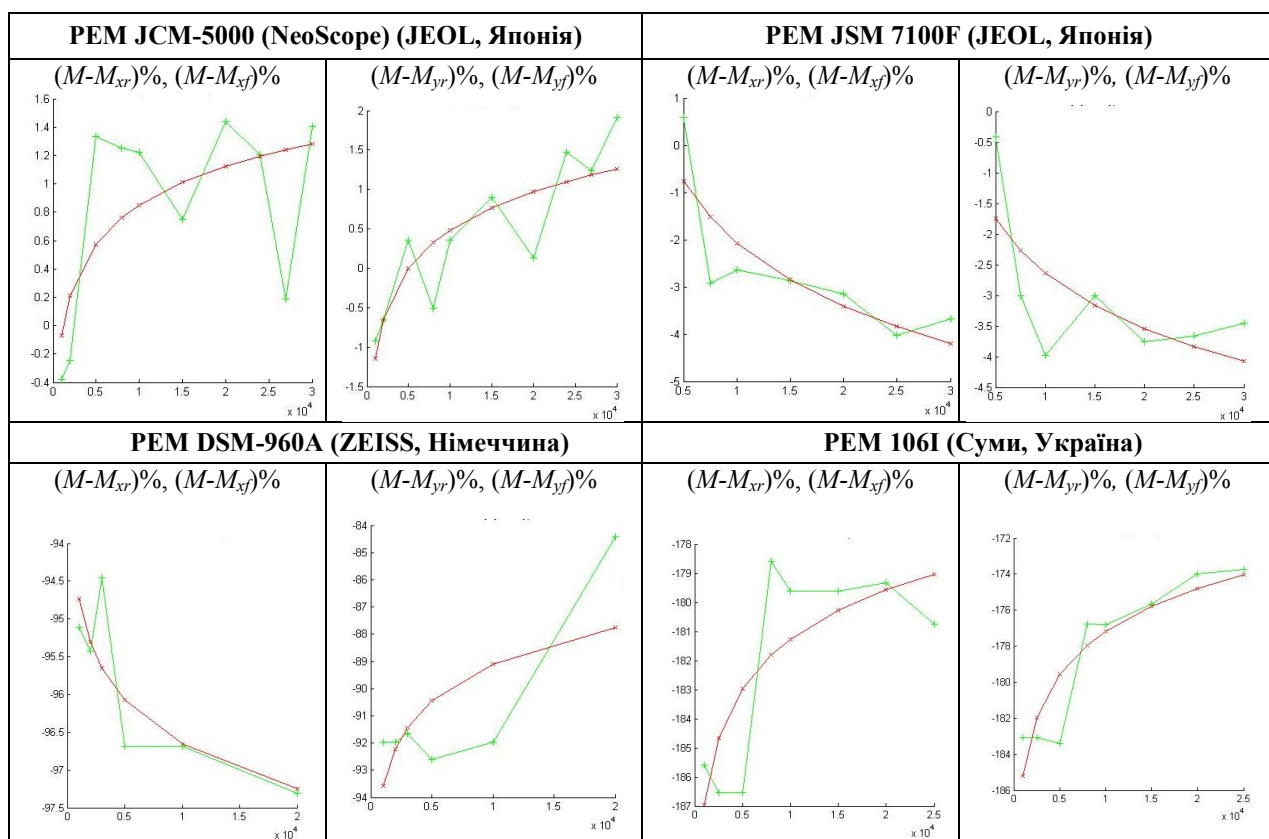


Рис.2. Графіки залежності різниць $(M-M_r)\%$ (зелені позначки) та $(M-M_f)\%$ (червоні позначки) від цілих масштабів M вздовж x та y напрямків. M_r – дійсні масштаби, M_f – фрактальні масштаби.

Значення коефіцієнтів A_{xf} (A_{yf}) та показників степенів D_{xf} (D_{yf}) фрактальних масштабів M_{xf} (M_{yf})

№	Назва PEM	Діапазон M^x	A_{xf}	D_{xf}	A_{yf}	D_{yf}
1	JCM-5000 (NeoScope) (JEOL, Японія)	1000 ^x -30000 ^x	1,02868436	1,00399655	1,05475106	1,00625075
2	JSM 7100F (JEOL)	2000 ^x -30000 ^x	0,86324953	0,98177745	0,89896265	0,98569637
3	DSM-960A (Zeiss)	1000 ^x -20000 ^x	1,92949231	0,99933573	2,08935202	1,01200954
4	PEM 106I (Україна)	1000 ^x -25000 ^x	3,04724281	1,00869793	3,10717019	1,01240569

Графіки на рис. 2. показують, що різниці між цілими і дійсними та цілими і фрактальними масштабами у зазначених діапазонах збільшень (табл. 2) складають :

- для PEM JCM-5000:
 - по x від - 0,4 % до + 1,4 %;
 - по y від - 1,5% до + 2 %;
- для PEM JCM-7100F:
 - по x від - 4 % до + 0,6 %;
 - по y від - 4 % до - 0,4 %;
- для PEM DSM-960A:
 - по x від - 97,5 % до - 94,5 %;
 - по y від - 94 % до - 84 %;
- для PEM 106 I:
 - по x від - 187 % до - 179 %;
 - по y від - 186 % до - 174 %.

Можна відзначити, що дійсні і фрактальні масштаби для PEM JCM-5000 та PEM JSM 7100F несуттєво відрізняються від масштабів, встановлених на шкалі PEM. Для PEM DSM-960A та PEM 106I спостерігаються значні відхилення від масштабів, встановлених на шкалі приладів, як для дійсних так і для фрактальних масштабів. Виконані розрахунки дали уточнені значення коефіцієнтів пропорційності A_{xf} (A_{yf}) для PEM DSM-960A та PEM 106 I (див. табл. 2).

Отже, без врахування знайдених масштабних коефіцієнтів результати вимірювань для PEM DSM-960A та PEM 106I не будуть коректними і приведуть до значних помилок у визначенні кількісних характеристик дослідних мікропо-верхонь. Результати досліджень цих PEM і дійсні масштаби цифрових PEM-зображень були отримані раніше в роботах [7, 9, 10].

Відомо, що фрактальна розмірність теоретично знаходиться в межах $1 < D < 2$ для одновимірного випадку. Зауважимо, що для JSM 7100F та PEM DSM-960A отримані експериментально значення експоненціальних показників є меншими ніж 1. Тому величину A_f

будемо інтерпретувати як коефіцієнт подібності, а експоненціальний показник D_f як скейлінговий показник [Потапов, [23]]. Наведемо результати практичного застосування фрактальних масштабів (надалі залишаємо термін «фрактальний масштаб»).

Обчислення діапазону збільшень тест-сітки за фрактальними масштабами.

Візьмемо за мінімальний масштаб M_0 таке збільшення тест-сітки, при якому крок тест-сітки на PEM зображенні дорівнює розміру пікселя:

$$M_0 = \frac{p}{r}, \quad (p \geq r), \quad (11)$$

де p – значення розміру пікселя PEM-зображення в мм, r – величина кроку тест-сітки в мм (для досліджуваної тест-сітки $r=1/1425$ мм).

Звідси випливає, що крок тест-сітки Δh в пікселях на зображенні в масштабі M дорівнює

$$\Delta h = M \cdot \frac{r}{p}. \quad (12)$$

Тоді кількість вузлів тест-сітки на зображенні розміру ($W \times H$) в пікселях в масштабі M дорівнює по горизонталі:

$$n_x = [W / \Delta x] + 1, \quad (13)$$

по вертикалі:

$$n_y = [H / \Delta y] + 1, \quad (14)$$

де Δx (Δy) крок тест-сітки в масштабі M по горизонталі (вертикалі), визначений за (12), тут квадратні дужки [...] – означають найбільше ціле число, що не перевищує значення частки. Причому вертикальний розмір H зображення визначається без інформаційної смуги (див. фото у табл.3).

Визначимо максимальне збільшення зображення тест-сітки, за яким можна, наприклад, обчислити коефіцієнти полінома другого степеня двох змінних, тобто на зображенні треба мати не менш 6-ти вузлів. Так як вертикальний розмір зображення H

менше горизонтального W , то достатньо задати кількість вузлів по y . Для того, щоб вузли не розташовувались на краях зображення задамо, наприклад, $n_y=4$. Максимальний масштаб обчислимо як

$$M_{\max} = \Delta y \cdot \frac{r}{p}, \quad (15)$$

де $\Delta y = \frac{H}{n_y - 1}$ - крок тест-сітки в пікселях. Пара

значень $(M_0, M_{\max})$ визначає діапазон збільшень для РЕМ-зображень тест-об'єкта.

Визначимо, яку роздільну здатність R (лін/мм), повинна мати тест-сітка, щоб її можна було використовувати для обчислення поправок за поліномом другого степеня двох змінних ($n_y=4$ як в попередньому випадку) при максимальних збільшеннях:

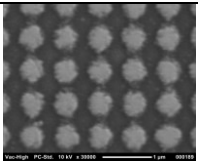
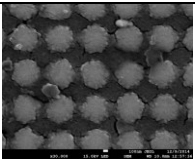
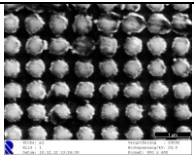
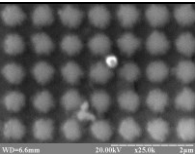
$$R = \frac{M_{\max} \cdot (n_y - 1)}{H \cdot p}, \quad (16)$$

де $M_{\max}$ – максимальний масштаб, вказаний в технічних характеристиках РЕМ (табл. 1), n_y , H , p мають ті самі значення, що в попередніх формулах.

В таблиці 3 подано характеристики РЕМ-зображень тест-об'єкта, обчислених для різних типів РЕМ. Для заданих максимальних масштабних збільшень визначено кількість вузлів на зображеннях 4-х типів РЕМ за даними масштабів M , M_r , M_f (11-15). Як бачимо на фото в табл. 3, розміри сіток на РЕМ-зображеннях JCM-5000 та JSM 7100F, обчислених за різними масштабами відрізняються не більше ніж на один рядок (стовпчик). Визначені розміри сіток для DSM 960A і РЕМ 106I, з використанням цілих масштабів, не відповідають реальності, в той час як для дійсних і фрактальних масштабів дають вірний результат. Зокрема відзначимо, що для РЕМ-зображень JCM-5000, JSM 7100F та DSM 960A результати обчислень дають кількість вузлів з врахуванням частин вузлів на краях зображень. На зображенні РЕМ 106I всі вузли тест-об'єкта розміщені в межах РЕМ-зображення у повній формі і відповідно результати обчислень збігаються з кількістю вузлів на знімку.

Таблиця 3

Характеристики цифрових зображень тест-об'єкта для різних РЕМ

Назва РЕМ	JCM-5000 (NeoScope)	JSM 7100F	DSM-960A	РЕМ 106 I
Зображення тест-об'єкта				
Масштаб M	30000 ^x	30000 ^x	20000 ^x	25000 ^x
Масштаб M_{xr}	29578,86	31104,11	39462,60	70190,65
Масштаб M_{yr}	29426,72	31037,31	36886,22	68431,17
Масштаб M_{xf}	29614,91	31249,43	38844,55	69758,01
Масштаб M_{yf}	29667,84	31253,74	37101,22	68508,67
Кількість вузлів сітки ($n_x \times n_y$) в межах зображ. за M , M_r , M_f	6x5 6x5 6x5	6x5 6x5 6x5	16x12 8x7 8x7	20x14 7x5 7x5
Діапазон збільшень для тест-сітки з $R=1425$ лін/мм	від 130 ^x до 44467 ^x	від 134 ^x до 42927 ^x	від 377 ^x до 75406 ^x	від 377 ^x до 111850 ^x
Розгортка, пікселів	1280x1080	1280x1024	800x600	1280x960
Розмір пікселя, мм	0,09132	0,09375	0,26450	0,26450
Роздільна здатність тест-сітки (лін/мм) для max збільшення	1282 для $M=40000^x$	9589 для $M=300000^x$	3439 для $M=181950^x$ (замість 100000 ^x)	10156 для $M=797150^x$ (замість 300000 ^x)

В останньому рядку таблиці 3 наведено, значення роздільних здатностей тест-сіток для

максимальних збільшень, заданих у технічних характеристиках (табл.1), необхідних для

обчислення коефіцієнтів поліному другого степеня. Для визначення роздільних здатностей тест-сіток для РЕМ DSM-960A і РЕМ 106I використано значення фрактальних масштабів, розраховані за наведеними в технічних характеристиках максимальними значеннями цілих масштабів.

Обчислення величин спотворень координат зображень тест-сітки з використанням дійсних та фрактальних масштабів для різних типів РЕМ.

Величини спотворень координат зображень тест-сітки по x та y визначаємо за поліномом загального виду 3-го степеня. Вхідними даними слугують: роздільна здатність тест-сітки (лін/мм); список значень масштабів, встановлених на шкалі приладу (цілі значення); списки значень відповідних дійсних масштабів (нецілі); параметри фрактальних масштабів (A_{xf} , D_{xf}) та (A_{yf} , D_{yf}).

Для кожного масштабу збільшення задаються виміряні вручну (або розпізнані автоматично [12, 13]) координати центрів вузлів тест-сітки.

Обчислювальна процедура визначення величин спотворень координат зображення тест-сітки за виміряними (розпізнаними) координатами центрів вузлів та істинними координатами відповідних вузлів тест-сітки складається із таких кроків:

1. Ввід координат точок розв'язку та контрольних точок для заданого масштабу.
2. Визначення значення фрактального масштабу за (1).
3. Обчислення кроку сітки у масштабі збільшення.
4. Формування схеми розташування точок розв'язку і контрольних точок.
5. Обчислення істинних координат центрів вузлів тест-сітки у масштабі збільшення.
6. Визначення коефіцієнтів полінома 3-го степеня по x і по y .
7. Обчислення залишкових значень за поліномом по точках розв'язку та контрольних точках.
8. Побудова векторних діаграм.

Розглянемо детальніше ті моменти наведеної блок-схеми, де суттєву роль відіграє масштаб збільшення.

По-перше, за виміряними (розпізнаними) координатами треба знайти відповідні істинні координати (мм) тест-сітки у масштабі збільшення

$$x_{icm}(y_{icm}) = k_x(k_y) \cdot h_x(h_y), \quad (17)$$

де $h_x(h_y) = r \cdot M_x(M_y)$ ($r=1/1425$ крок істинної сітки в мм); $M_x(M_y)$ – задані дійсні або фрактальні масштаби, обчислені за (1); k_x і k_y – це кількість ліній (проміжків) від точки початку системи координат (центрального вузла) до вимірюваної точки, відповідно, вздовж осей x і y :

$$k_x(k_y) = [x_{вим}(y_{вим}) / h_x(h_y)]. \quad (18)$$

(Квадратні дужки тут означають заокруглення результатів до цілого значення.)

Зауважимо, що кількість ліній на зображенні тест-сітки обернено-пропорційна величині масштабу. Тому, якщо масштаб менше реального то, під час обчислення кількості ліній тест-сітки за виміряними (обчисленими) координатами точок ближче до країв зображення накопичується помилка і виникає одна чи дві зайвих ліній в залежності від кроку сітки.

Звідси випливає, що з одного боку треба знати як можна точніше реальний масштаб збільшення, а з іншого боку проміжок між вузлами сітки для апроксимації треба збільшити, щоб не перейти на іншу лінію сітки апроксимації. Ці зауваження найбільш актуальні для масштабів 1000^x , 2000^x , де невеликі зміни значень масштабу можуть привести до зміни величини $k_x(k_y)$.

Проблеми виникають при визначенні величин $k_x(k_y)$ для масштабів збільшення в діапазоні 1000^x - 2000^x там, де крок сітки одного порядку з точністю вимірів (1-3 пікселів). Наприклад, крок сітки по x у масштабі 1000^x , обчислений за відповідними фрактальними масштабами (12), становить для: РЕМ JCM-5000 – 7,7; JSM 7100F – 7,5; РЕМ DSM-960A – 5,1; РЕМ 106I – 7,6 пікселів. Тому використання дійсних або фрактальних масштабів дозволяє, як показує досвід, дозволяє майже безпомилково визначити кількість проміжків $k_x(k_y)$ у масштабі 1000^x за виміряними координатами і знайти істинні координати.

По-друге, для виявлення картини масштабних та дисторсійних спотворень точки

розташовують симетрично відносно центрального вузла тест-сітки. Крім того, виміряні точки розподіляють на точки розв'язку – для визначення коефіцієнтів поліному і контрольні - для оцінки точності результатів обчислень. Отже, під час автоматичного розпізнавання центрів вузлів треба із отриманого масиву вибрати точки розв'язку та контролю. З цією метою для кожного масштабу формуємо (задаємо вручну) схему розташування точок для апроксимації та контролю, а саме точні значення $k'_x(k'_y)$. Наприклад, для РЕМ JCM-5000 в масштабі 1000^x схема розташування точок для тест-сітки розміру (167x134) така:

$k'_x = [-82 \ -74 \ -66 \ -58 \ -50 \ -42 \ -34 \ -26 \ -18 \ -9 \ 0 \ 9 \ 18 \ 26 \ 34 \ 42 \ 50 \ 58 \ 66 \ 74 \ 82]$

$k'_y = [65 \ 57 \ 49 \ 41 \ 33 \ 25 \ 17 \ 9 \ 0 \ -9 \ -17 \ -25 \ -33 \ -41 \ -49 \ -57 \ -65]$.

За заданою схемою формуємо дві матриці $[x_{ij}]$ та $[y_{ij}]$ кожна розміру (17x21), де в шаховому порядку розташовані координати точок розв'язку і контролю (див. рис. 3). Також, задану схему вузлів використовуємо, для виправлення значень $k_x(k_y)$, обчислених за виміряними (розпізнаними) координатами. Якщо обчислена за (18) кількість ліній $k_x(k_y)$ не дорівнює значенню $k'_x(k'_y)$, вказаному в списку, і $|k_x - k'_x| < d$ ($|k_y - k'_y| < d$), де d допуск (задана кількість ліній), то значення $k_x(k_y)$ замінюється на $k'_x(k'_y)$ зі списку. Значення допуску вибирається залежно від збільшення, а саме, при великих збільшеннях, допуск встановлюється менше. (Для 1000^x допуск $d=3$, для збільшень більше ніж $2000^x - d=0,5$).

Наприклад, для РЕМ JCM-5000 з цілим масштабом $M=1000^x$ (крок сітки $h_x = h_y = 0.7018$ мм) помилки виникають при обчисленні величин k_y на одну лінію по y : 66 (замість 65), 58 (57), -58 (-57), -65 (-66) на двох крайніх рядках сітки.

Використання дійсних та фрактальних масштабів дає більші значення $h_x(h_y)$ ніж при цілих масштабах (для дійсних ($M_{xr}=1003,80^x$, $M_{yr}=1009,23^x$): $h_x = 0,7044$ мм, $h_y = 0,7082$ мм; для фрактальних ($M_{xf}=1000,67^x$, $M_{yf}=1009,23^x$): $h_x = 0,7022$ мм, $h_y = 0,7089$ мм) тому, в даному випадку, помилок на краях не виникає і значення $k_x(k_y)$ визначаються точно.

За наявністю схеми розташування точок для апроксимації помилкові значення $k_x(k_y)$ можуть бути програмно виправлені.

По-третє, порівняємо для РЕМ 7100F результати апроксимації з використанням фрактального масштабу і цілого масштабу $M=10000^x$, встановленого на шкалі приладу. На рис. 3 а,б наведено векторні діаграми геометричних спотворень зображень, визначених за координатами вузлів тест-об'єкта. Геометричні спотворення РЕМ зображення (в мм) визначаємо як різниці між виміряними (в мм) і істинними координатами (в мм) вузлів тест-сітки:

$$\Delta x(\Delta y) = x_{вим}(y_{вим}) - x_{іст}(y_{іст}). \quad (19)$$

Векторні діаграми, таким чином, показують напрямок реальних зміщень точок відносно неспотворених (істинних) їх положень. Як бачимо, рис. 3 а ($M=10000^x$) наочно ілюструє радіальний характер спотворень від центра зображення до країв, а на рис. 3 б, після врахування фрактальних масштабів РЕМ-зображень ($M_{xf}=10207,39^x$, $M_{yf}=10263,96^x$) спостерігаємо картину дисторсійних спотворень. Зауважимо, що після апроксимації з використанням поліному 3-го степеня двох змінних векторні діаграми на рис. 3 в, г демонструють однакову картину залишкових спотворень. Вектори для наочності збільшено у 20 разів.

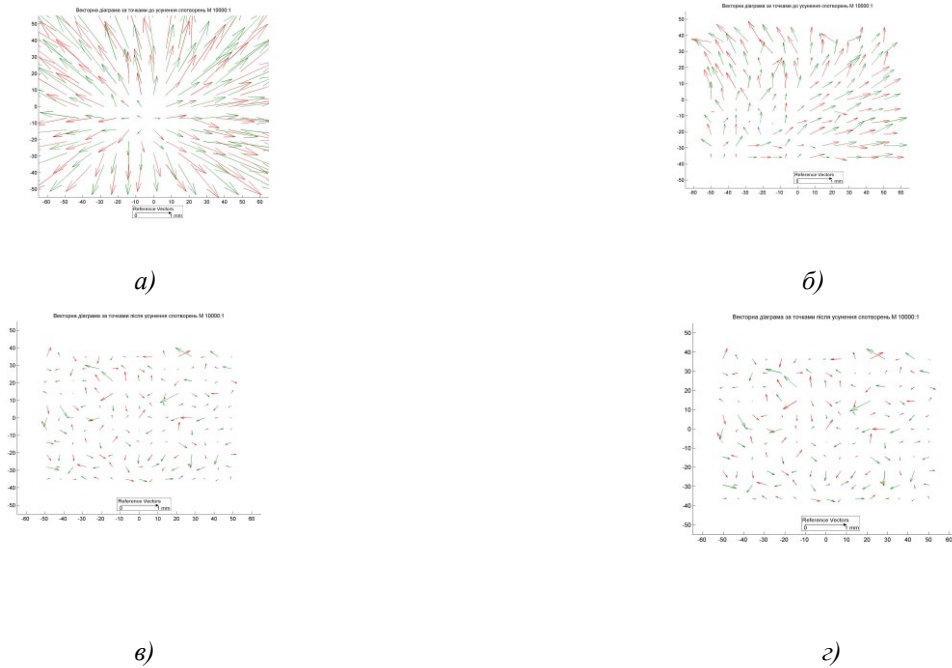


Рис.3. Векторні діаграми геометричних спотворень РЕМ-зображень до (а, б) і після їх апроксимації (в, г).

На підставі виконаних досліджень можна зробити наступні висновки.

Наукова новизна

Розроблена авторами методика отримання фрактальних та метричних характеристик РЕМ-зображень виконана вперше в Україні. Запропонована методика супроводжується на всіх її етапах авторським програмним забезпеченням і показала свою ефективність та доцільність.

Практичне значення

Застосування даної методики встановлення та врахування фрактальних і метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень дозволяє з більшою точністю визначати дійсні значення збільшень (масштабів) цифрових РЕМ-зображень та величини їх геометричних спотворень. Врахування цих характеристик РЕМ-зображень дає змогу суттєво підвищити точність отримання просторових кількісних параметрів мікроповерхонь дослідних об'єктів, а отже покращити їх експлуатаційні та економічні характеристики. Отримані характеристики можуть бути додатковими важливими кількісними параметрами для

виявлення особливостей цифрових РЕМ зображень.

Висновки

1. Встановлено аналітичне співвідношення між фіксованим на шкалі приладу і «фрактальним» збільшенням (масштабом) та виконано розрахунок коефіцієнтів подібності A_f та експоненціальних показників D_f для фрактальних збільшень (масштабів) вздовж осей x та y для 4-х типів РЕМ. Зображення тест-об'єкта в різних масштабах, отриманих на одному РЕМ, мають однакові параметри фрактальних масштабів, які можуть бути використані як додаткові кількісні характеристики РЕМ.

2. Із аналізу серій різномасштабних РЕМ-зображень встановлено, що найменше відрізняються від масштабів, фіксованих на шкалі приладу в діапазоні $1000^x - 30000^x$, дійсні і фрактальні масштаби для JCM-5000 та JSM 7100F і для них найменше виражений анізотропний характер спотворень вздовж осей x та y . Для DSM-960A і PEM 106I метричні характеристики не відповідають масштабам, встановленим на шкалі приладу у всьому діапазоні збільшень (масштабів).

3. Отримано і приведено формули для розрахунку можливого діапазону збільшень зображень тест-об'єкта в залежності від кроку

тест-об'єкта, розміру пікселя та масштабу. Наведено результати обчислень діапазону збільшень для 4-х типів РЕМ. Максимальні збільшення визначались з врахуванням можливості визначення дисторсійних спотворень за поліномом другого степеня.

4. Обчислено роздільні здатності тест-об'єктів, які придатні для визначення величин спотворень зображень тест-об'єкта при максимальних збільшеннях, вказаних в технічних характеристиках РЕМ.

5. Наведено особливості застосування алгоритму обчислення величин спотворень при автоматичному розпізнаванні центрів вузлів на зображення тест-об'єкта. Показано, що при невеликих збільшеннях ($1000\times - 2000\times$) наявність схеми розташування точок розв'язку та контрольних точок з оптимальним кроком дозволяє запобігти помилок під час знаходження істинних координат вузлів тест-сітки, що відповідають розпізнаним (вимірним).

6. Векторні діаграми, які побудовані з використанням фрактальних масштабів, показують картину реальних дисторсійних спотворень. Застосування фіксованих на шкалі приладу збільшень (масштабів) дозволяє відобразити переважно лише радіальні спотворення у вигляді векторів від центра зображення до країв. Після апроксимації з використанням загального поліному 3-го степеня залишкові спотворення суттєво (у 2-10 разів) менші від дійсних і складають переважно 1-2 пікселя незалежно від збільшень (масштабів) РЕМ-зображень.

7. Отримані співвідношення для обчислення фрактальних масштабів дозволяють автоматично визначити дійсне збільшення (масштаб) РЕМ-зображень і разом з визначеними коефіцієнтами поліномів ефективно усувають їх дисторсійні спотворення. Тим самим суттєво підвищується точність отримання просторових координат точок мікроповерхонь дослідних об'єктів і побудова їх цифрових моделей рельєфу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Анищенко В. С. Лекции по нелинейной динамике: Учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по спец. "Радиофизика и электроника" и "Физика" / В.С. Анищенко, Т. Е. Вадивасова. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2010. 322 с.
- Бобро Ю. Г. Принципы фрактальности в механике разрушения металлов / Ю. Г. Бобро, В. Н.

- Мельник, В. У. Волошин, А. В. Шостак // Изв. РАН. Металлы. – 1997. – № 2. – С. 119–122.
- Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс // М., "Техносфера", 2006, - 616 с.
- Иванчук О. М. Структура та функції програмного комплексу «Dimicros» для опрацювання РЕМ-зображень на цифровій фотограмметричній станції / О. М. Иванчук, І. В. Хрупін // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2012. Вип. I (23). - С. 193-197.
- Иванчук О. М. Дослідження точності визначення дійсних величин збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore) фірми JEOL // Геодезія, картографія і аерофотознімання. - Львів, 2012. Вип. 76. - С. 80-84.
- Иванчук О. М. Дослідження величин геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960A (Carl Zeiss, Німеччина) та точності їх врахування / О. М. Иванчук, Т. Барфельс, Я. Геер, В. Герер // Геодезія, картографія і аерофотознімання. - Львів, 2013. Вип. 78. - С. 120-126.
- Иванчук О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore) та їх апроксимація // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-геологічна. – Донецьк, 2013. Вип. 1(18). - С. 91-97.
- Иванчук О. Дослідження похибок збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106I (Суми, Україна) за допомогою спеціальних тест-об'єктів / О. Иванчук, М. Чекайло // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2014. Вип. 79. - С. 82-88.
- Иванчук О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106 I (Суми, Україна) // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2014. Вип. II(28). - С.74-77.
- Иванчук О. Особливості калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на різних РЕМ // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2015. Вип. I (29). - С. 168-173.
- Иванчук О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JSM-7100F (JEOL, Японія) та точність їх апроксимації // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2015. Вип. 81. - С. 101-109.
- Иванчук О. Розроблення та дослідження технології автоматизації калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore) (JEOL, Японія) і їх врахування / О. Иванчук, О.

- Тумська // Геодезія, картографія і аерофотознімання. - Львів, 2016. Вип. 84. - С. 56-64.
- Іванчук О. Методика автоматизованого визначення координат центрів вузлів тест-об'єкта за його РЕМ-зображеннями з використанням засобів MatLab / О. Іванчук, О. Тумська // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2017. Вип. І(33). - С. 158-165.
- Іванчук О. Порівняльний аналіз статистичних та скейлінгових характеристик РЕМ-зображень тест-об'єкта, отриманих на різних типах РЕМ / О. Іванчук, О. Тумська // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - Львів, 2017. Вип. ІІ(34). - С. 119-131.
- Костышин М. Т. Квантовая электроника / М. Т. Костышин, К. С. Мустафин // К., -1982.-Вип. 23. - С. 29-33.
- Калантаров Е. И. Фотограмметрическая калибровка электронных микроскопов / Е. И. Калантаров, М. Ж. Сагындыкова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. М., -1983.-№4. - С.76-80.
- Мельник В. Н. Калибровка геометрических искажений РЭМ-снимков / В. Н. Мельник, В. Н. Соколов, О. М. Иванчук, О. В. Тумская, М. П. Шебатинов // Рук. деп. в ВИНТИ. М., -1984.- №528. -18 с.
- Мельник В. Н. Фрактальная и стереометрическая оценки РЭМ-изображений шероховатых поверхностей / В. Н. Мельник, В. Н. Соколов // Изв. РАН. Серия физическая. - 1993. - № 8. - С. 99-105.
- Мельник В. Н. Определение фрактальности поверхностей разрушения по данным РЭМ-стереоизмерений / В. Н. Мельник, Ю. Г. Бобро, А. В. Шостак, В. У. Волошин // Трение и износ. - 1996. - Т. 16, № 6. - С. 38-41.
1. Мельник В. М. Методи кількісної характеристики мікроструктури ґрунту / В. М. Мельник, В. У. Волошин, Ф. П. Тарасюк, Ю. С. Бліндер // Вісн. Львів. держ. ун-ту. Серія географічна / Львів. держ. ун-т ім. Івана Франка; голов. ред. С. П. Позняк. - Л., 1999. - № 25. - С. 24-27.
- Мельник В. М. Оцінка деструктивних змін кісткової тканини методами структурної функції та фрактального аналізу / В. М. Мельник, В. У. Волошин // Наук. вісн. Волин. держ. ун-ту ім. Лесі Українки. - Луцьк, 2002. - №3. - С. 166-171.
- Мельник В. М. Растрово-електронна стереомікрофрактографія. Монографія / В. М. Мельник, А. В. Шостак // Луцьк: «Вежа», 2009. - 469 с.
- Потапов А. А. Новейшие методы обработки изображений / А. А. Потапов, Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов, А. А. Пахомов, В. А. Герман. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 496 с.
- Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. / Е. Федер. -М.: Мир, 1991. - 254 с.
- Шостак А. В. Методи і моделі мікрофотограмметрії у прикладних наукових дослідженнях: автореф. дис... докт. техн. наук : 05.24.01 / Шостак Анна Володимирівна; Луцький нац. техн. університет. - Київ, 2012. - 28 с.
- Bovik A.I. Handbook of Image and Video Processing. - Academic Press., A Harcourt Science and Technology Company, 2000. - 891 p.
- Boyde A. Photogrammetry and Scanning electron microscopy / A. Boyde, H. F. Ross // Photogrammetric Record.-1975.-Vol.8.-№46. -P. 408-457.
- Burkhardt R. Untersuchungen zur kalibrierung eines Elektronen mikroskopes // Mitt. geod. Inst. Techn. Univ. Graz.-1980.-№35.
- Cromley R. G. Digital Cartography. // Robert G. Cromley, 1992 by Prentice-Hall. 317 p.
- Ghosh S. K. Photogrammetric calibration of a scanning electron microscope // Photogrammetria.-1975.-V.31.-№31. - P. 91-114.
- Ghosh S. K. Scanning Electron Micrography and Photogrammetry / S. K. Ghosh, H. Nagaraja // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.- 1976.-Vol.42.-№5. - P. 649-657.
- Howell P. A practical method for the correction of distortions in SEM photogrammetry // Proc. Of the Annual Scanning Electron Microscope Symposium. Chicago, Illinois.-1975. -P. 199-206.
- Mandelbrot B. The fractal geometry of nature. N. Y.: Freeman, 1983.- 469 p.
- Richardson L. The Problem of Contiguity: An Appendix of Statistic of Deadly Quarrels. General Systems Year Book. -1961. - 6. - P. 139-187.