

**В.М. Мельник**, *д-р техн.наук, професор,  
завідувач кафедри геодезії, землевпорядкування  
та кадастру Східноєвропейського національного  
університету імені Лесі України*

**В.П. Мендель**, *асп. кафедри геодезії,  
землевпорядкування та кадастру  
Східно-європейського національного  
університету імені Лесі України*

## **ДИСКРЕТНА ОЦІНКА ПЛОЩИННОЇ ЕРОЗІЇ ЗА МЕТОДАМИ КОРОТКОБАЗИСНОЇ ФОТОГРАМЕТРІЇ**

*Запропонована методика дискретної оцінки площинної ерозії ґрунту із застосуванням методів короткобазисної фотограмметрії. Виготовлено спеціальну фотоустановку, тестовий об'єкт та здійснено їх калібрування. Розроблено методика стереознімання в польових умовах та отримано конкретні дані точності визначення об'ємів площинного змиву. Складено чіткі алгоритми фотограмметричної обробки отриманих знімків, у яких зменшено кількість обчислювальних операцій. Запропонований підхід зарекомендував себе як стійкий з огляду на значну поширеність проблеми недостатності вхідної інформації. Розглянуто елементи частотно-спектрального аналізу в ерозієзнавстві, які дають змогу виявляти мікрочастки ґрунту, найбільш піддатливі процесам ерозії. Розроблено схему аналізу поверхні досліджуваного ґрунту (класифікація вхідної інформації, обробка, отримання результатів дослідження), який зазнає ерозії. Запропоновано використовувати короткобазисну фотограмметрію як еталонний показник об'ємів змитого ґрунту для порівняння з багатьма відомими методами.*

**Ключові слова:** *ерозія, стереовимірювання, автокореляційна функція, короткобазисна фотограмметрія.*

**Вступ.** Сучасні ерозійні процеси (водна ерозія, дефляція) зазвичай є результатом господарського використання земель з порушенням природних умов і загальних закономірностей водного і вітрового режиму ґрунтів [1; 2]. Однією з основних причин виникнення ерозії є знищення природного рослинного покриву, погіршення інфільтраційної і водопоглинальної властивості ґрунтів та їх протиерозійної стійкості [3; 4].

Подальше поглиблене вивчення ерозійних процесів потребує застосування нових, сучасніших методів і технологій дослідження [6; 7]. Дієві та рішучі заходи для відновлення і збереження навколишнього середовища – одне з актуальних завдань сьогодення [6]. В цьому аспекті можуть бути успішно використані найновіші досягнення у сфері прикладної фотограмметрії, зокрема для отримання точної кількісної інформації [8].

Тема статті відповідає загальнодержавній концепції «Національної програми охорони земель» та тісно пов'язана з темою: «Дослідження сучасного стану та розробка засобами ГІС-технологій і РЕМ-мікроскопії засад раціонального

землекористування ерозійно-деградованих земель Волинської височини», виконуваний на кафедрі геодезії, землевпорядкування та кадастру Волинського національного університету ім. Лесі Українки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження водної та вітрової ерозії ґрунтів методами прикладної фотограмметрії, що мають важливе практичне значення, висвітлювалося багатьма авторами [9; 10]. При цьому особливу увагу приділено застосуванню різних теоретичних підходів, неоднакового обладнання, різноманітних методів камеральної обробки та інтерпретації отриманих результатів [11; 12]. Серед відомих публікацій учених України, Росії та інших зарубіжних країн слід відмітити особливо важливі, що належать авторам, чиї результати видаються найвагомішими і найцікавішими, зокрема такими як С.Ю. Булигін, О.О. Світличний, В.М. Мельник, М.Т. Процик, Ю.М. Трунін, А.Ф. Варфоломєєв, І.М. Нетребіна та ін. Комплексне використання досліджень різнопланових напрямів дає змогу формувати методичку ведення захисних робіт, основу на будь-яких рівнях організації сільськогосподарських угідь [13; 14].

**Постановка завдання.** Мета дослідження – розроблення теоретико-методологічних засад оцінювання площинного змиву ґрунту в дискретних точках (площа близько 1 м<sup>2</sup>). Для цього потрібно було виготовити спеціальну фотоустановку та тестовий об'єкт; виконати їх калібрування; розробити методичку стереознімання в польових умовах та отримати кількісні характеристики точності такого методу; розробити оригінальну теоретичну основу частотно-спектрального аналізу цифрових моделей нанорельєфу стокових майданчиків.

**Виклад основного матеріалу.** Теоретичні основи фотограмметричної обробки неметричних знімків в проєктивних координатах. Теоретично цей метод був розроблений доцентом Ю.М. Труніним [15]. У подальшому наведемо деякі доповнення.

Фотограмметричну обробку знімків зазвичай виконують в декілька етапів. Пропонуємо виконувати обчислення в такій послідовності.

*1. На першому етапі* слід визначити координати точок фотографування ( $X_s, Y_s, Z_s$ ) і коефіцієнти проєктивних перетворень  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$ . Для цього потрібно знати шість опорних точок в предметній координатній системі, які не лежать в одній площині.

Напрямки (вектори) на три з них вибирають як координатний базис, а решту векторів можна розкласти за цими напрямками згідно з виразом

$$\rho_i \bar{r}_i = A_1 \xi \bar{R}_1 + A_2 \eta \bar{R}_2 + A_3 \zeta \bar{R}_3 \quad (1)$$

де  $\xi, \eta, \zeta$  – однорідні проєктивні координати поміряних на знімку опорних точок:

$$\xi = \frac{\bar{r}_2 \bar{r}_3 \bar{r}_1}{\bar{r}_2 \bar{r}_3 \bar{r}_4}; \eta = \frac{\bar{r}_2 \bar{r}_3 \bar{r}_1}{\bar{r}_2 \bar{r}_3 \bar{r}_4}; \zeta = \frac{\bar{r}_2 \bar{r}_3 \bar{r}_1}{\bar{r}_2 \bar{r}_3 \bar{r}_4}; \bar{r}_i - \text{вектор, що визначає положення точки на знімку;}$$

$A_1, A_2, A_3$  – змішані векторні добутки, що складені векторами  $\bar{R}_1, \bar{R}_2, \bar{R}_3, \bar{R}_4$ , що визначають напрямки на базисні точки:

$$A_1 = \bar{R}_2 \bar{R}_3 \bar{R}_4 = \bar{R}_2 (\bar{R}_3 \times \bar{R}_4); \quad A_2 = \bar{R}_3 \bar{R}_1 \bar{R}_4 = \bar{R}_3 (\bar{R}_1 \times \bar{R}_4); \quad A_3 = \bar{R}_1 \bar{R}_2 \bar{R}_4 = \bar{R}_1 (\bar{R}_2 \times \bar{R}_4).$$

Вектори  $\bar{R}_i$  і  $\bar{r}_i$  в координатній формі матимуть вигляд:

$$\bar{R}_i = \begin{pmatrix} X_i - X_S \\ Y_i - Y_S \\ Z_i - Z_S \end{pmatrix}, \quad \bar{r}_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Використовуючи додаткові опорні точки, наприклад 5 і 6, отримуємо шість рівнянь в координатній формі, в яких невідомими будуть  $X_S, Y_S, Z_S$  – координати центру фотографування і коефіцієнти  $\gamma_1, \gamma_2$ .

Для їх визначення вихідну систему (1) зведемо до лінійного виду, в результаті отримаємо систему рівнянь поправок загального виду:

$$a_{1i} \delta X_S + a_{2i} \delta Y_S + a_{3i} \delta Z_S + a_{4i} \delta \gamma_1 + a_{4i} \delta \gamma_2 + l_i = v_i, \quad (3)$$

де  $a_{ij}$  – часткові похідні за відповідними змінними від виразу (1).

У матричному вигляді для  $N$  опорних точок ця система має такий вигляд:

$$A \delta \bar{G}_i + \bar{L} = \bar{V}. \quad (4)$$

Систему рівнянь (4) слід розв'язувати за методом найменших квадратів (МНК) за умови  $V^T V = \min$  [16]. Одним з можливих оптимальних методів реалізації МНК є сингулярне розкладання матриці [17]:

$$A = U \Sigma T, \quad (5)$$

де  $U, T$  – ортогональні матриці;  $\Sigma$  – сингулярна діагональна матриця.

При цьому вектор невідомих  $\delta \bar{G}_i$  визначається таким чином:

$$\delta \bar{G}_i = T \Sigma^{-1} \cdot U^T L. \quad (6)$$

За такого підходу виключається процес складання нормальних рівнянь, завдяки цьому зменшується кількість обчислювальних операцій. Окрім того, обчислювальна стійкість методу є високою, що важливо, оскільки вихідна система часто належить до слабообумовлених. Завдання з визначення координат точок фотографування розв'язують окремо для кожного знімка стереопари. Ця обставина є суттєвою, особливо в обробці неметричних знімків, наприклад макрознімків, отриманих з певним збільшенням, коли в зону перекриття може не попасти достатня кількість опорних точок через те, що об'єкт займає більшу частину зображення.

*Другий етап* – визначення просторових координат визначуваних точок в системі координат тест-об'єкта потрібно виконувати за дещо модифікованими формулами прямої фотограмметричної засічки, при цьому індекс 1, 2 є відповідним лівій і правій точці фотографування:

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{S(1,2)} \\ Y_{S(1,2)} \\ Z_{S(1,2)} \end{pmatrix} + N \begin{pmatrix} X_{(1,2)i} \\ Y_{(1,2)i} \\ Z_{(1,2)i} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

де  $X_{(1,2)i}, Y_{(1,2)i}, Z_{(1,2)i}$  – просторові фотограмметричні координати.

Для кожного знімка стереопари просторові координати обчислюють за формулами:

$$\begin{aligned}
 X_{ji} &= \frac{[\gamma_1 \xi_{ji} (X_1 - X_{sj})]^{-1} + [\gamma_2 \eta_{ji} (X_2 - X_{sj})]^{-1} + [\gamma_1 \zeta_{ji} (X_3 - X_{sj})]^{-1}}{[\gamma_1 \xi_{ji}]^{-1} + [\gamma_2 \eta_{ji}]^{-1} + \zeta_{ji}}; \\
 Y_{ji} &= \frac{[\gamma_1 \xi_{ji} (Y_1 - Y_{sj})]^{-1} + [\gamma_2 \eta_{ji} (Y_2 - Y_{sj})]^{-1} + [\gamma_1 \zeta_{ji} (Y_3 - Y_{sj})]^{-1}}{[\gamma_1 \xi_{ji}]^{-1} + [\gamma_2 \eta_{ji}]^{-1} + \zeta_{ji}}; \\
 Z_{ji} &= \frac{[\gamma_1 \xi_{ji} (Z_1 - Z_{sj})]^{-1} + [\gamma_2 \eta_{ji} (Z_2 - Z_{sj})]^{-1} + [\gamma_1 \zeta_{ji} (Z_3 - Z_{sj})]^{-1}}{[\gamma_1 \xi_{ji}]^{-1} + [\gamma_2 \eta_{ji}]^{-1} + \zeta_{ji}}.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Скалярний множник  $N$  обчислюють за відомими в фотограмметрії формулами:

$$\begin{aligned}
 N_x &= \frac{X_{s_2} Y_2 - Y_{s_2} X_2}{X_1 Y_2 - Y_1 X_2}; & N_y &= \frac{Y_{s_2} Z_2 - Z_{s_2} Y_2}{Y_1 Z_2 - Z_1 Y_2}; \\
 N_z &= \frac{Z_{s_2} X_2 - X_{s_2} Z_2}{Z_1 X_2 - X_1 Z_2}; & N &= \frac{N_x + N_y + N_z}{3}.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Використовуючи наведений алгоритм, обчислюють потрібні для розв’язання конкретних прикладних задач параметри.

За такого підходу параметри всіх досліджуваних об’єктів отримують в єдиній системі координат, тому не виникає труднощів у статистичній обробці результатів, крім того, під час графічної інтерпретації даних немає потреби в їх додатковій обробці (зсув, поворот, масштаб), легко виконується оверлей графічних образів (накладання) для візуального аналізу й отримання додаткових кількісних показників [18].

*II. Експериментальні дослідження.* В експериментальних дослідженнях був використаний тест-об’єкт, за який слугувала металева рама (рис.1). По периметру були жорстко закріплені через однакові проміжки опорні точки у вигляді трикутних призм різної висоти: кутові – А, В, С, D і проміжні – а, b, c, d, e, f, k, m. Опорними точками слугували також перехрестя 25 металевих взаємно перпендикулярно закріплених струн, а також круглі отвори для закріплення на краях рами – 20, разом 57 опорних точок. Товщина струни становить 0,015 мм.

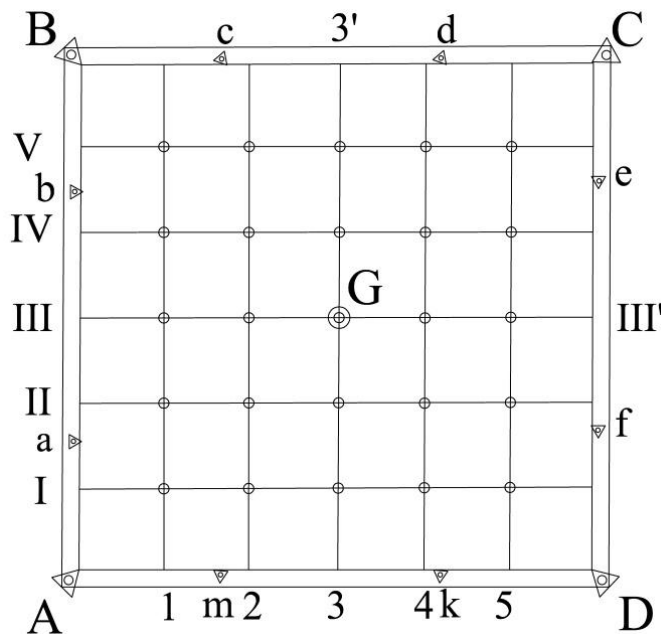


Рис. 1. Загальний вигляд тестової рами

Тест-об'єкт був виготовлений на приладобудівному заводі ПАТ «Електротермометрія» (м.Луцьк). Лінійні вимірювання опорних точок виконано за допомогою женецької лінійки (точність – 0,2 мм). Врівноваження здійснено параметричним і корелатним методами геодезичного чотирикутника (ABCD) та центральної фігури з полюсом в точці G, утвореної опорними точками (ГАШВ 3' СШ' D 3 А). Середньоквадратичні похибки такі:  $m_{x,y} = \pm 2\text{мм}$ ,  $m_z = \pm 1,5\text{мм}$ . Результати вимірювань призматичних опорних точок наведено в таблиці.

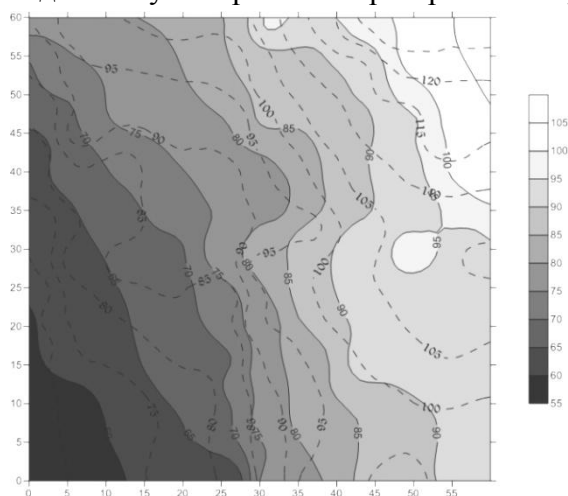
Таблиця

Координати трикутних призм

Назва точки	Координати (мм)		
	X	Y	Z
A	-4,0	-4,0	50,3
B	-0,9	603,8	14,0
C	598,8	602,8	53,5
D	593,5	-4,0	7,0
a	-3,2	163,0	60,0
b	-1,9	420,0	25,0
c	167,9	603,5	14,0
d	458,9	603,0	14,0
e	597,2	422,5	25,5
f	594,9	166,0	20,0
k	441,5	-4,0	30,0
m	150,0	-4,0	5,0

Польові стереознімальні роботи виконано фотокамерою NIKOND 90 (фокусна віддаль  $f = 20\text{мм}$ ) за допомогою спеціально виготовленої для короткобазисної фотограмметрії фотоустановки. Параметри стереознімання: висота  $H=1,2\text{м}$ ,  $B=0,41\text{ м}$ , масштаб 1:60, базисне співвідношення – 1/3. Стереовимірювання виконано на ЦФС «Дельта» і паралельно за допомогою цейсівського стереокомпаратора «Стекометр».

За результатами досліджень була отримана картограма змиву (рис. 2).



— — ізолінії до початку дощування  
 - - - — ізолінії після дощування

Рис. 2. Картограма змиву побудована за здійсненим набором точок

Для наочності були побудовані 3D-моделі поверхні ґрунту до початку (рис.3, *a*) і після дощування (рис. 3,*б*).

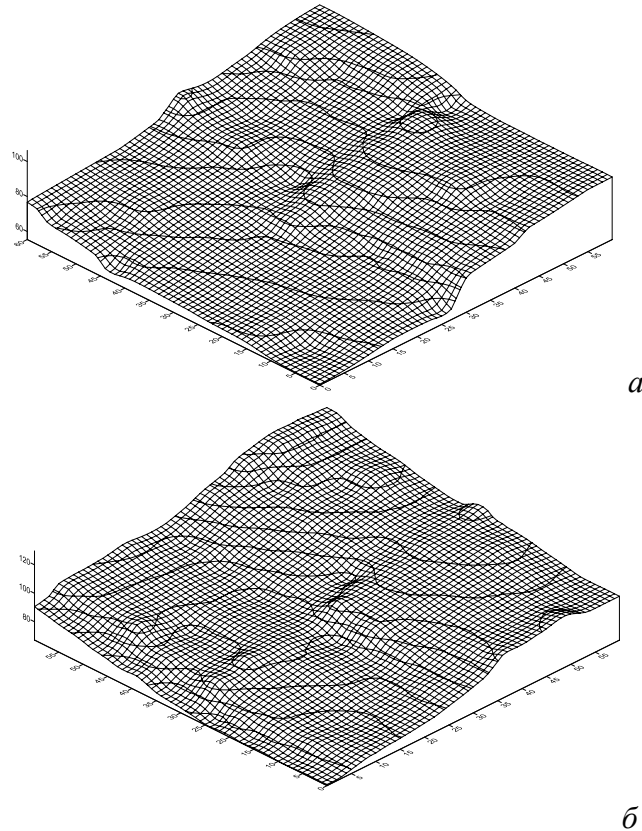


Рис. 3. 3D-модель поверхні ґрунту до початку дощування (*a*) та після дощування (*б*)

Для визначення об'ємів змитого ґрунту використано побудовані TIN- та grid-моделі. Об'єм змитого ґрунту становить:  $0,00531 \text{ м}^3$  та  $0,00530 \text{ м}^3$  відповідно.

За результатами фотограмметричної обробки серії макетних знімків середні квадратичні похибки визначення координат точок об'єкта, отримані з порівняння вимірних і «дійсних» координат 24 контрольних точок, характеризуються такими величинами:  $m_x = \pm 2 \text{ мм}$ ;  $m_y = \pm 3 \text{ мм}$ ;  $m_z = \pm 4 \text{ м}$ . На шести опорних точках похибки не перевищували таких значень:  $m_x = \pm 2 \text{ мм}$ ;  $m_y = \pm 1 \text{ мм}$ ;  $m_z = \pm 1 \text{ мм}$ . Найкращих результатів досягають, коли комірки тест-сітки становлять 5-10 мм; відповідна точність вимірювання висот – в межах 0,5...1,5 мм.

Для визначення інтенсивності змиву ґрунту за неметричними знімками короткобазисного стереознімання були побудовані топографічні плани стокового майданчика, що відповідають 7-10 хвилинному дощуванню.

За отриманими топографічними планами через однакові проміжки, що становлять 20 см на місцевості, були побудовані поперечні профілі [19]. Об'єми змитого ґрунту за 7-10 хвилинні періоди для відповідних умов експерименту визначаються переважно вертикальними перерізами, а в результаті дощування для порівняння обрахували об'єм за TIN-моделлю способом трикутних призм [20].

У цьому випадку об'єм змитого ґрунту дорівнює різниці об'ємів ґрунту відносно умовної поверхні на початку і в кінці відповідного етапу дощування.

Очевидно, в межах кожної трикутної призми:

$$V_i = S_i h_{icp} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \bar{h}_i & \bar{h}_i & \bar{h}_i \\ X_1 & X_2 & X_2 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \end{vmatrix}, \quad (10)$$

де  $S_i$  – площа основи, що визначається за координатами вершин основи трикутної призми. Для  $i$ -ї трикутної призми  $h_{icp} = (h_1 + h_2 + h_3)/3$ .

Повний об'єм дорівнює сумі елементарних об'ємів:

$$V_{повн.} = \sum_1^N V_i. \quad (11)$$

Для способу вертикальних профільних перерізів з очевидних побудов об'єм змитого ґрунту становитиме:

$$V_{повн.} = V_1 + V_2 + \dots + V_k = \frac{S_1 + S_2}{2} L_1 + \frac{S_2 + S_3}{2} L_2 + \dots + \frac{S_k + S_{k+1}}{2} L_k, \quad (12)$$

де  $S_1, S_2, \dots, S_{k+1}$  – площі вертикальних перерізів між поверхнями ґрунту на кінцевий і початковий момент досліджень;  $L_1, L_2, \dots, L_{k+1}$  – віддалі на місцевості між сусідніми перерізами, які в нашому випадку дорівнюють 20 см. Тоді

$$V_{повн.} = \sum_1^k V_{ел.} = L/2 (S_1 + 2S_2 + \dots + 2S_k + S_{k+1}). \quad (13)$$

Звідси

$$V_{повн.} = L \sum_1^k S + L/2 (S_1 + S_{k+1}). \quad (14)$$

Площі поперечних перерізів  $S$  на профілях знаходять як суму площ трапецій, основами яких є відмітки точок, тобто  $S = F_1 + F_2 + \dots + F_n$ , а  $F = h_{cp} \cdot d$ , де  $h_{cp} = (h_1 + h_2)/2$  – середня лінія трапеції з основами  $h_1$  і  $h_2$ ;  $d$  – відстань між основами трапеції.

Точність фотограмметричного методу визначення об'єму змитого ґрунту визначається точністю вимірювання відміток і густотою профільних перерізів. Точність визначення відміток  $m_h$  залежить від точності стереовимірювань і ступеня розрихлення. Зрозуміло, що цей процес в різні роки і в різні пори року відбувається по-різному, оскільки залежить від глибини оранки, ґрунтооброблюваних знарядь, вологості ґрунту тощо. Експериментальні дослідження точності стереовимірювань висотних та планових (перехресть) точок тест-об'єкта показали, що  $m_h \approx 1,2$  мм. Тоді середня квадратична похибка середньої висоти майданчика  $m_H$  за умови, що похибки розрихлення ґрунту  $m_{hp}$  і за стереовимірюванням є незалежними, становитиме:

$$m_H^2 = m_{H_{cp}}^2 + m_{hp}^2 = (1.2)^2 + (1.2)^2 = 1.2 \text{ мм} \sqrt{2} = 1,20 \times 1,4 \text{ мм} \approx 1,7 \text{ мм}.$$

Отже, точність стереовимірювань повинна бути близько 1,5-1,7 мм, тоді точність визначення об'єма площинного змиву дорівнюватиме 2%.

III. Частотно-спектральна характеристика площинного змиву ґрунту. У разі оцінювання зміни стану мікрорельєфу ґрунтового покриву внаслідок площинного змиву важливими є визначення спектральної щільності та автокореляційної функції

(АКФ), які дають змогу визначати мікрочастки ґрунту, найбільш податливі процесам ерозії. Такі характеристики можна визначати, використовуючи одновимірне перетворення Хартлі [21]. Обмежимося теоретичними викладками.

Згладжену оцінку взаємного спектра визначають за формулою:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} D(\tau)R(\tau)\exp(-i2\pi\tau)d\tau, \quad (15)$$

де  $f$  – частота;  $R(\tau)$  – автокореляційна функція;  $D$  – кореляційне вікно;  $\tau_m$  – довжина автокореляційної функції,

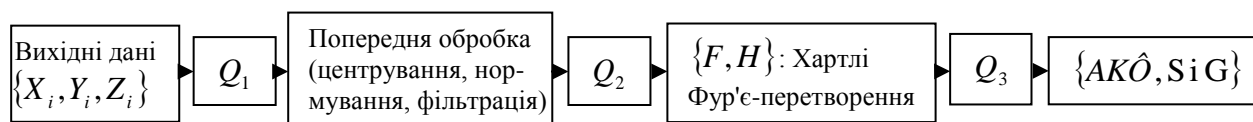
$$D = \begin{cases} 1 + \cos(\pi\tau/\tau_m), & |\tau| \leq \tau_m \\ 0, & |\tau| > \tau_m \end{cases}.$$

Якщо під час визначення частотної амплітудної характеристики використовувати замість частоти  $f$  довжину хвилі  $\lambda$ , то вираз для коефіцієнта передачі матиме вигляд:

$$|G(\lambda)| = \sqrt{\frac{S_0(\lambda)}{S_i(\lambda)}}, \quad (16)$$

де  $S_0, S_i$  – щільність спектра потужності мікронерівностей на вході і на виході [22].

Згідно з виразом (16) довжина хвилі  $\lambda$  цифрової моделі поверхні ґрунту відображається із збільшенням в  $|G(\lambda)|$  раз. Якщо немає змін, то профілі таких поверхонь цілком однакові і  $|G(\lambda)|=1$ . Однак в дійсності обидва профілі не збігаються і  $|G(\lambda)| \neq 1$ . Всі потрібні обчислення виконують за наведеною далі схемою, де  $Q_1, Q_2, Q_3$  – оператори перетворень:



**Висновки.** У спостереженнях за динамікою процесів ерозії ґрунтів, зокрема для визначення об'єму змитого ґрунту, можна використати короткобазисну фотограмметрію, яка стане еталонним значенням для порівняння з багатьма відомими методами.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Процик М.Т. Статистичне моделювання дослідження залежності між еродованістю рілнихих сільськогосподарських угідь та кутами нахилу [Текст] / М.Т. Процик, П.М. Зазуляк, В.І. Гавриш // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2002. – Вип.62. – С. 54-62.
2. Лисецкий Ф.Н. Эрозия почв и пространственно-временное моделирование формирования гумусового горизонта [Текст] / Ф.Н. Лисецкий // Эрозионные и русловые процессы. – Вып. 3. – 2000. – С. 47-51.
3. Чандра А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы [Текст] / А.М. Чандра, С.К. Гош. – М.: Техносфера, 2008. – 308 с.



4. *Коломейченко В.В.* Рациональное использование склоновых земель / В.В. Коломейченко, А.И. Петелько, А.И. Крупчатников; под ред. В.В. Коломейченко. – Орел: Труд, 2000. – 288 с.
5. *Булыгин С.Ю.* Формирование экологически сбалансированных ландшафтов: проблема эрозии [Текст] / С.Ю. Булыгин, М.А. Неаринг. – Харьков: Эней – 1999 – 272 с.
6. *Світличний О.О.* Основи геоінформатики: навчальний посібник [Текст] / О. О. Світличний, С. В. Плотницький. – Суми: Університетська книга, 2006. – 291 с.
7. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://skagit.meas.ncsu.edu/>
8. *Мельник В.М.* Кількісна стереомікрофрактографія: монографія [Текст] / В.М. Мельник, А.В. Шостак. – Луцьк: Твердиня, 2010. – 457 с.
9. *Глотов В.М.* Дослідження ерозійної небезпеки ґрунтів детального рівня цифровим наземним стереофотограмметричним методом (частина 1) [Текст] / В.М. Глотов, М.Т. Процик // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – № I(23) – С. 184-187.
10. *Варфоломеев А.Ф.* Изучение эрозионных факторов с использованием картографо-фотограмметрического метода: автореф. дис. канд. геогр. наук / спец. 11.00.12 «Географическая картография и геоинформатика» / А.Ф. Варфоломеев. – М., 1997. – 22 с.
11. *Мельник В.М.* Морфолого-спектральна оцінка параметрів гідромеханічної моделі ерозії ґрунту [Текст] / В.М. Мельник, В.П. Мендель, В.Ф. Радзій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва – 2012. – № I(23) – С. 188–192.
12. *Мельник В.М.* Растрово-електронна стереомікрофрактографія: Монографія [Текст] / В.М. Мельник, А.В. Шостак. – Ред.-видавн. відділ ВНУ ім. Лесі Українки. – Луцьк, 2009. – 468 с.
13. *Лисецкий Ф.Н.* Пространственно-временная организация агроландшафтов [Текст] / Ф.Н. Лисецкий. – Белгород: Изд-во Белгородского ун-та, 2000. – 302 с.
14. *Марциневская Л.В.* Оценка противозащитной эффективности севооборотов в Белгородской области [Текст] / Л.В. Марциневская, Л.И. Реутова // Доклады и сообщения XVIII пленарного межвузовского координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. – Курск, 2003. – С. 125-126.
15. *Трунин Ю.М.* Некоторые вопросы теории фотограмметрии [Текст] / Ю.М. Трунин // Изв. вузов.: Геодезия и аэрофотосъемка, 1959. – №5. – С. 34-37.
16. *Урмаев М.С.* Метод наименьших квадратов при обработке астронегативов с использованием проективных преобразований [Текст] / М.С. Урмаев, В.М. Безменов // Изв. вузов.: Геодезия и аэрофотосъемка, 1991. – №2. – С. 49-58.
17. *Гук А.П.* Выбор математической модели калибровки радиолокационных снимков [Текст] / А.П. Гук, Г.Б. Мчедлишвили // Геодезия и картография, 1991. – №4. – С. 95-101.
18. *Бурштинська Х.* Цифрове моделювання рельєфу для розв'язання прикладних задач [Текст]: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Ландшафтознавство: традиції та тенденції» (8-12 вересня 2004р.) / Х. Бурштинська, М. Процик, А. Гукасов. – Львів, 2004. – С. 207.
19. *Панкратьев Ю.Н.* Инженерная фотограмметрия. [Текст] / Ю.Н. Панкратьев, Б.С. Пузанов, В.М. Сердюков. – Львов: Изд-во ЛПИ, 1964. – 287 с.
20. *Дубиновский В.Б.* Аналитическое моделирование местности. [Текст] / В.Б. Дубиновский. – М.: Недра, 1989. – 138 с.

21. Брейсуелл Р. Преобразование Хартли: теория и приложения [Текст] / Р. Брейсуелл. – М.: Мир, 1990. – 165 с.
22. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложения [Текст] / Г. Дженкинс, Д. Ваттс. – М.: Мир, 1971.– Вып. 1. – 287 с.

#### REFERENCES

1. Protsyk M.T., & Zazuliak P.M., & Gavrysh V.I. (2002) Statistichne modelyuvannya doslidzhennya zalezhnosti mizh erodovanistyu rilnychyh silskogospodarskykh ugid za kutamy nahylu [Statistical modeling of the study of dependence between the erodibility of field crops and the angles of the slopes]. *Geodeziya, kartografiya i aerofotoznimannya – Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 62, 54-62 [in Ukrainian].
2. Lisetskii F.N. (2000) Eroziia pochv i prostranstvenno-vriemiennoie modelirovaniie formirovaniia gumusovogo gorizonta [Soil erosion and spatio-temporal modeling of the humus formation.]. *Eroziionnyie i ruslovyie protsessyi – Erosion and channel processes*, 3, 47-51 [in Russian].
3. Chandra, A.M., & Gosh, S.K. (2008). *Distantionnoie zondirovaniie i gieografichieskiiie informatsyonnyie sistemy*[Remote exploration and geographic information systems]. Moskov: Tiekhnosfiera [in Russian].
4. Kolomeychenko, V.V., & Petelko, A.I., & Krupchatnikov, A.I. (2000). *Ratsionalnoie ispolzovaniie sklonovykh ziemel* [Rational use of slope lands]. V.V. Kolomeychenko (Ed). Orel: Trudv [in Russian].
5. Bulygin, S.Yu., & Nearing, M. A. (1999). *Formirovanie ekologichieski sbalansirovannykh landshaftov: probliema erozii* [Formation of ecologically balanced landscapes: the problem of erosion]. Harkov [in Russian].
6. Svitlichnii, O.O., & Plotnitskii, S. V. (2006). *Osnovy geoinformatyky: Navchalnii posibnyk* [Fundamentals of Geoinformatics: Manual]. Sumy: VTD „Universytetska knyha” [in Ukrainian].
7. Mitasova, H, et al. (1998). *Multidimensional soil erosion/deposition modeling and visualization using GIS. Final report for USA CERL*. University of Illinois, Urbana-Champaign, IL. Retrieved from: <http://skagit.meas.ncsu.edu/>.
8. Melnyk, V.M., & Shostak, A.V. (2010). *Kilkisna stereomikrofraktohrafiia: Monohorafiiia* [Quantitative stereomicrofracturing: Monograph]. Lutsk: Vyd. «Tverdynia» [in Ukrainian].
9. Glotov, V.M., & Protsyk, M.T. (2012). Doslidzhennia eroziinoi nebezpeky gruntiv detalnogo rivnia tsyfrovym nazemnym stereofotogrammetrichnym metodom (chastyna 1) [The study of soil erosion hazard of detailed level by digital terrestrial stereo photogrammetry method (part 1)]. *Suchasni dosiagnennia geodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Recent advances in geodetic science and industry*, I(23), 184-187 [in Ukrainian].
10. Varfolomieiev, A.F. (1997). Izuchieniie eroziionnykh faktorov s ispolzovaniiem kartografo-fotogrammetrichieskogo metoda [The study of erosion factors using the cartography photogrammetry method]. *Extended abstract of candidate’s thesis*. Moskva [in Russian].
11. Melnyk, V.M., & Mendel, V.P., & Radzii, V.F. (2012). Morfologo-spektralna otsinka parametriv gidromehanichnoi modeli erozii gruntu [Morphological and spectral estimation of the parameters of hydromechanical model of soil erosion]. *Suchasni dosyagnennia geodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Recent advances in geodetic science and industry*, I(23), 188–192 [in Ukrainian].

12. Melnyk, V.M., & Shostak, A.V. (2009). *Rastrovo-elektronna stereomikrofraktografiia: Monografiia [Quantitative stereomicrofracturing. Monograph]*. Lutsk: Red.-vydavn. viddil VNU im. Lesi Ukrainky [in Ukrainian].
13. Lisetskii, F.N. (2000). *Prostranstvienna-vriemiennaia organizatsiia agrolandshaftov [Spatiotemporal organization of agricultural landscapes]*. Belgorod: izd-vo Belgorodskogo universiteta [in Russian].
14. Martsinievskaia, L.V., & Reutova, L.I. (2003). Otsenka protivozaschitnoi effektivnosti sievooborotov v Bielgorodskoi oblasti [Evaluation of anti-safety efficiency of crop rotations in Belgorod region]. *Doklady i soobsheniia XVIII plienarnogo miezhvuzovskogo koordinatsionnogo sovieta po probleme erozionnyh, ruslovyh i ustievyh protsessov – Reports and communications XVIII plenary Interuniversity Coordinating Council on the issue of erosion, fluvial and estuarine processes*, 125-126 [in Russian].
15. Trunin, Yu.M. (1959). Nekotorye voprosy teorii fotogrammetrii [Some problems in the theory of photogrammetry]. *Izv. vuzov.: Geodeziya i aerofotos'emka – Proc. of the universities.: Geodesy and aerial photography*, 5, 34-37 126 [in Russian].
16. Urmaiev M.S., & Bezmenov V.M. (1991). Metod naimienshih kvadratov pri obrabotke astronegativov s ispolzovaniem proektivnyh prieobrazovani [The least squares method in the processing astronegatives using projective transformations]. *Izv. vuzov.: Geodeziya i aerofotos'emka – Proc. of the universities.: Geodesy and aerial photography*, 2, 49-58 [in Russian].
17. Guk, A.P., & Mchedlishvili, G.B. (1991). Vybor matematichieskoi modeli kalibrovki radiolokatsionnyh snimkov [The choice of the mathematical model calibration of radar images]. *Geod.i kart. – Geod. and Cart*, 4, 95-101 [in Russian].
18. Burshtynska, H., & Protsyk, M., & Gukasov, A. (2004). Tsyfrove modeliuvannia reliefu dlia rozviazannia prykladnyh zadach [Digital terrain modeling for solving applied problems]. *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferentsii «Landshaftoznavstvo: traditsii ta tendentsii» – International scientific and technical conference "Landscape: Traditions and Trends"*, 207 [in Ukrainian].
19. Pankratiev, Yu.N., & Puzanov, B.S., & Sierdiukov, V.M. (1964). *Inzheniernaia fotogrammetriia. [Photogrammetry Engineering]*. Lvov: Izd-vo LPI [in Russian].
20. Dubinovskiy, V.B. (1989). *Analiticheskoe modelirovanie mestnosti. [Analytical terrain modeling]*. Moskva: Niedra [in Russian].
21. Breisuell, R. *Prieobrazovaniie Hartli: Teoriia i prilozheniia [Hartley Transformation: Theory and Applications]*. Moskva: Mir [in Russian].
22. Dzhenkins, G. *Spektralnyi analiz i iego prilozheniia [Spectral analysis and its applications]* Moskva: Mir [in Russian].

**В.М. Мельник**

**В.П. Мендель**

### **ДИСКРЕТНАЯ ОЦЕНКА ПЛОСКОСТНОЙ ЭРОЗИИ МЕТОДАМИ КОРОТКОБАЗИСНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ**

*Предложена методика дискретной оценки плоскостной эрозии почвы с применением методов короткобазисной фотограмметрии. Изготовлена специальная фотоустановка, тестовый объект и осуществлено их калибровки. Разработана методика стереосъемки в полевых условиях и получены конкретные данные точности*

*определения объемов плоскостного смыва. Составлены четкие алгоритмы фотограмметрической обработки полученных снимков, в которых уменьшено количество вычислительных операций. Предложенный подход зарекомендовал себя как устойчивый, учитывая значительную распространенность проблемы недостаточности исходной информации. Рассмотренные элементы частотно-спектрального анализа в эрозиоведении, которые позволяют устанавливать микрочастицы почвы, наиболее податливые процессам эрозии. Разработана схема анализа поверхности исследуемой почвы (классификация входной информации, обработка, получение результатов исследования), которая подвергается процессам эрозии. Предлагается использовать короткобазисную фотограмметрию как эталонный показатель объемов смытой почвы для сравнения с многими известными методами.*

**Ключевые слова:** эрозия, стереоизмерения, автокорреляционная функция, короткобазисна фотограмметрия.

**V.M. Melnyk**

**V.M. Mendel**

### **DISCRETE VALUATION OF SHEET EROSION BY THE METHODS OF SHORT BASELINE PHOTOGRAMMETRY**

*The technique of discrete valuation of sheet soil erosion with the appliance of the methods of short baseline photogrammetry is suggested. The special photomounting and the test object are fabricated and their calibration is executed. The method of stereo photography in the field environment is developed and the accurate data of defining the scope of sheet flood is received. The developed algorithms for precise photogrammetric processing the images, which included reducing the number of computational operations. This approach proved to be a stable, given the high prevalence of the problem of insufficient input. The elements of frequency spectral analysis in the erosion science that allow to set ground microparticles most pliable erosion. Developed specific circuit analysis investigated the soil surface (classification of incoming information processing, the results of research) that undergoes erosion. It is proposed to used short baseline photogrammetry as a reference figure amounts washed off the ground for compared with other well-known methods.*

**Keywords:** erosion, stereo measuring, autocorrelation function, short baseline system.

Надійшла до редакції

27.05.2014.