

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРОЗІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ГРУНТІВ НА ДЕТАЛЬНОМУ РІВНІ ЦИФРОВИМ НАЗЕМНИМ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ (ЧАСТИНА 2)

**В. Глотов, М. Процик, Д. Жук**

Національний університет “Львівська політехніка”

**Ключові слова:** охорона ґрунтів, цифрові неметричні камери, тестовий майданчик, лабораторні дослідження, змив ґрунту.

### Постановка проблеми

Як зазначено у частині першій публікації, проблема охорони ґрунтів від ерозії стає все актуальнішою, а відтак необхідно розробляти нові методи дослідження еrozії ґрунтів [1, 5]. На особливу увагу заслуговує моніторинг змивних процесів, а також зручні й ефективні методи досліджень, як за собівартістю, так і за точністю визначення шуканих величин. Отже, питання полягає у тому, щоб опрацьовувати універсальні способи дослідження змиву ґрунтів, які б дали можливість отримувати максимальну інформацію, як кількісну, так і якісну. Такий метод запропонували автори у попередній частині публікації, але безпосередній процес дослідження змиву ґрунту від кутів нахилу ще повною мірою не був апробований.

### Зв’язок із важливими науковими й практичними завданнями

Нагадаємо з минулої публікації, що науковими дослідженнями переважно показано: ґрунти є не тільки основним засобом сільськогосподарського виробництва, але й найважливішим компонентом наземних біогеоценозів, потужним акумулятором енергії на Землі, регулятором складу атмосфери і гідросфери, надійним бар’єром на шляху міграції забруднювальних речовин [5].

### Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

У роботі [4] на сучасному рівні висвітлено ситуацію стосовно еrozії ґрунтів. У монографії розглянуто методологічні, методичні та прикладні питання еrozієзнавства. Представлено результати багаторічних досліджень водної еrozії ґрунтів, визначено нові підходи до математичного моделювання еrozійних і ґрунтоутворювальних процесів, розрахунку, прогнозу і обґрунтування раціонального використання еrozійно небезпечних земель, виконаних з урахуванням світового досвіду. Наведено й обґрунтовано вирішення різних завдань прикладного еrozієзнавства з використанням геоінформаційних (ГІС) технологій.

У праці [3] акцентується на тому, що для проведення контролю за станом ґрунту та створення баз даних геоінформаційних систем (ГІС) найбільш прийнятним і економічно вигідним рішенням є використання технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Наведено опис експериментального лабо-

раторного пристосування для досліджуваних земельних ділянок. За допомогою апаратури вимірювалося висхідне радіотеплове випромінювання під кутом 100 градусів від горизонтальної поляризації на довжинах хвиль 3, 6, 5, 11 см і в окремих експериментах на довжині хвилі 15 см. Далі подано опис методики проведення радіометричних вимірювань, застосованої для дослідження характеристик різних ґрунтів. Проведено аналіз похибок вимірювань. Поріг флюктуаційної чутливості становив 0,5 К за часу накопичення  $t = 1$  с для радіометрів на довжині хвиль  $\lambda = 3,6$ ,  $\lambda = 11$  і  $\lambda = 15$  см, і 1 К за  $t = 16$  с для вимірювача ПК7 – 20 на  $\lambda = 5$  см. Похибка абсолютноного калібрування при цьому становила 1,5–2,5 К на всіх довжинах хвиль. Кожен цикл починається після штучного зрошення або випадання природних опадів і закінчується, коли коефіцієнт вологості верхнього шару завтовшки 0–3 см ставав меншим за 0,03. У процесі проведення вимірювань радіоконтрастної температури ділянок одночасно проводилися вимірювання термодинамічної температури на глибині 0,5 та 1,5 см і періодичні (два–три рази на добу) вимірювання вологості та щільноти верхніх шарів 0–1 см, 1–2 см і 2–3 см термостатно-ваговим способом. Отже, тепер перевагу в дослідженнях надають моделям, за допомогою яких можна швидко, достатньо точно та ефективно виконати експериментальні роботи стосовно об’єкта, що досліджується. Ще один важливий фактор, який впливає на користь моделювання, – це, безумовно, собівартість досліджень.

Отже, аналіз літературних джерел показав, що тема доволі актуальнa, особливо з погляду створення різноманітних моделей для дослідження еrozії ґрунтів.

### Невирішенні частини загальної проблеми

Частини загальної проблеми полягає у дослідженні та вдосконаленні лабораторного пристрою для визначення змиву ґрунтів. Одним із реальних способів отримання достовірної, оперативної та точної інформації про процес змиву ґрунтів є дистанційні методи на основі короткобазисної фотограмметрії з подальшим аналітичним та цифровим опрацюванням цифрових зображень, з використанням для цього багатого арсеналу сучасних фотограмметричних технологій. Оцінку стану змиву ґрунтів засобами фотограмметрії слід подати як систему, яка об’єднує сучасні технічні засоби і методи обробки даних, їх передачу, перетворення, інтерпретацію та видання у вигляді цифрових, графічних і описових моделей з використанням додаткових даних конкретного природно-географічного району.

### Постановка завдання

Першим етапом наших досліджень є:

- створення моделі тест-сітки [1] зі стоконапрямним лотком та стокоприймальним резервуаром, а також її калібрування;
- створення стендового майданчика для засипання ґрунту з вивідними гвинтами для імітації кутів нахилу;
- визначення об'ємів змитого ґрунту в лабораторних умовах за різних кутів нахилу схилу та точності визначення цього параметра.

### Виклад основного матеріалу

Як у будь-якому експериментально-інженерному дослідженні, необхідно виконати апріорну оцінку точності шуканих величин і логічно довести можливість реалізації запропонованого способу. По-перше, визначимо, з якою точністю можливо обчислити координати точок на місцевості, використавши для цього формули нормального випадку знімання, оскільки фактично ми імітували цей випадок:

$$X_\phi = \frac{B}{p} x_\alpha, \quad Y_\phi = \frac{B}{p} y_\alpha, \quad Z_\phi = -\frac{B}{p} f. \quad (1)$$

Продиференціювавши їх, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} dX_\phi &= \frac{x_\alpha}{p} dB + \frac{B}{p} dx_\alpha - \frac{x_\alpha B}{p^2} dp \\ dY_\phi &= \frac{y_\alpha}{p} dB + \frac{B}{p} dy_\alpha - \frac{y_\alpha B}{p^2} dp \\ dZ_\phi &= -\frac{f}{p} dB - \frac{B}{p} df + \frac{fB}{p^2} dp \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Перейдемо до середньоквадратичних похибок:

$$\left. \begin{aligned} m_{X_\phi} &= \left[ \left( \frac{x_\alpha}{p} \right)^2 m_B^2 + \left( \frac{B}{p} \right)^2 m_{x_\alpha}^2 - \left( \frac{x_\alpha B}{p^2} \right)^2 m_p^2 \right]^{1/2} \\ m_{Y_\phi} &= \left[ \left( \frac{y_\alpha}{p} \right)^2 m_B^2 + \left( \frac{B}{p} \right)^2 m_{y_\alpha}^2 - \left( \frac{y_\alpha B}{p^2} \right)^2 m_p^2 \right]^{1/2} \\ m_{Z_\phi} &= \left[ \left( \frac{f}{p} \right)^2 m_B^2 + \left( \frac{B}{p} \right)^2 m_f^2 - \left( \frac{fB}{p^2} \right)^2 m_p^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $m_{X_\phi}, m_{Y_\phi}, m_{Z_\phi}$  – середньоквадратичні похибки координат  $X_\phi, Y_\phi, Z_\phi$ ;  $B = 250$  мм – довжина базису знімання;  $x_\alpha, y_\alpha$  – 11 мм, 7 мм – координати крайніх точок знімка;  $p = 7$  мм – середнє значення повздовжнього паралаксу;  $f = 50$  мм – фокусна відстань знімальної камери;  $m_B = 0,1$  мм – похибка вимірювання базису знімання;  $m_{x_\alpha}, m_{y_\alpha}, m_p = 0,005$  мм – середньоквадратичні похибки вимірювання координат знімка  $x_\alpha, y_\alpha$  та паралаксу  $p$  на ЦФС “Дельта-2”;  $Y_\phi = 2500$  мм – відстань до об'єкта знімання.

Підставивши ці значення у формулу (3), обчислимо середні квадратичні похибки:

$$m_{X_\phi} = 0,6 \text{ мм}, \quad m_{Y_\phi} = 0,4 \text{ мм}, \quad m_{Z_\phi} = 1 \text{ мм}.$$

Оскільки остаточними величинами є об'єм ґрунтів, то розрахуємо відносну похибку об'єму за формuloю [6]:

$$\frac{M_v}{V} = \sqrt{\left( \frac{M_s}{S} \right)^2 + \left( \frac{M_{h \text{ cep.} \varepsilon}}{h \text{ cep.} \varepsilon} \right)^2}. \quad (4)$$

У формулі (4)  $M_s^2$  – це квадрат СКП площин, яка визначається за формулою:

$$\begin{aligned} M_s^2 &= 4a^2 b^2 \left( \frac{m_B}{B} \right)^2 + a^2 b^2 \left( \frac{m_f}{f} \right)^2 + \\ &+ \frac{2Y_0^2 \cdot b \cdot \Delta Y}{f^2} m_x^2 + \frac{Y_0^2 \cdot b \cdot \Delta Y (4X_0^2 + a^2)}{2B^2 \cdot f^2} m_p^2 + \\ &+ \frac{Y_0^2 \cdot a \cdot b \cdot \Delta X (2Y_0^2 + 3b^2)}{B^2 \cdot f^2} m_p^2, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $a=560$  мм – розмір масиву по осі абсцис;  $b = 600$  мм – розмір масиву по осі ординат;  $\Delta X, \Delta Y = 40$  мм – розміри сторін одного прямокутника рамки;  $m_f = 0,005$  мм – похибка вимірювання фокусної віддалі.

Врахувавши, що  $\frac{Y_0}{B \cdot f} = \frac{1}{p}$ , отримаємо кінцеву формулу визначення відносної похибки площин:

$$\begin{aligned} \left( \frac{M_s}{s} \right)^2 &= 4 \left( \frac{M_b}{B} \right)^2 + \left( \frac{m_f}{f} \right)^2 + \frac{2B^2 \Delta Y}{a^2 b \cdot p^2} m_x^2 + \\ &+ \frac{\Delta Y (4X_0^2 + a^2)}{2a^2 b \cdot p^2} m_p^2 + \frac{\Delta X (2Y_0^2 + 3b^2)}{ab^2 + p^2} m_p^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Підставивши у формулу наведені вище значення, отримаємо  $\left( \frac{M_s}{s} \right) = 0,1 \%$ .

$M_{h \text{ cep.} \varepsilon}^2$  – СКП значення перевищень, обчислимо за формулою:

$$M_{h \text{ cep.} \varepsilon}^2 = h^2 \left[ \left( \frac{m_B}{B} \right)^2 \right] + \left( \frac{B}{p} \right)^2 m_z^2 + \frac{B^2 \cdot m_{\Delta z}^2 + h^2 \cdot m_p^2}{L \cdot p^2}. \quad (7)$$

де  $h=7$  мм – середнє перевищення;  $L=210$  – кількість комірок у рамці;  $m_{\Delta z} = 0,007$  мм – похибка вимірювання на моделі;  $\frac{m_b}{B} = \frac{1}{2500}$ .

Підставивши у формулу (7) ці значення, отримаємо –  $\frac{M_h}{h} = 0,3 \%$ .

За результатами розрахунків за формулами (6) і (7), згідно з формулою (4), відносна похибка об'єму становитиме  $\frac{M_v}{V} = 0,4 \%$ .

Перейдемо тепер до безпосереднього опису експерименту. Лабораторна модель дослідження являє собою стоковий тест-майданчик, який складається з піддона, в якому міститься аналог ґрунту (в цьому випадку дрібнозернистий пісок об'ємом  $V = 40000 \text{ см}^3$ ), стоконапрямного і стокоприймального пристрой (рис. 1). Окрім цього, на бортах майданчика встановлено вивідні ручки, за допомогою яких можливо встановлювати нахили схилу.

На стоковий майданчик було встановлено сталеву раму, на якій натягнутий (по ширині та довжині) інварний дріт з інтервалом 4 см та зафікований у місцях перетину з рамою та між собою за допомогою пайки. Це утворило сітку, яка є основним елементом у дослідженні. Розміри сталевої рами: 80×68 см, розміри робочої поверхні 60×56 см [1].

Опишемо детальніше кожен з пунктів експериментальних робіт.

Для цифрового стереофотограмметричного знімання використано цифрову камеру Canon EOS 450D. Перед експлуатацією знімальної камери визначено елементи внутрішнього орієнтування та дисторсію об'єктива за відповідними способами [2]. Технічні характеристики камери наведено у табл. 1.

Таблиця 1

**Технічні характеристики цифрової камери  
Canon EOS 450D**

Матриця	
Загальна кількість пікселів	12,4 млн
Фізичний розмір кадру	22,2×14,8 мм
Максимальна роздільна здатність	4272×2848
Глибина кольору	42 біт
Кількість ефективних пікселів	12,2 млн
Тип матриці	CMOS
Чутливість	100–1600 ISO, Auto ISO
Режими знімання	
Швидкість знімання	3,5 кадр. / с
Формат кадру (фотознімання)	3:2
Максимальна серія знімків	53 для JPEG, 6 для RAW
Час роботи таймера	2,10 с
Поле зору видошукача	95 %

На першому етапі стоковий тест-майданчик разом із сіткою встановлено під кутом нахилу  $\omega = 10^\circ$ . “З руки” було отримано стереопару цифрових зображень з базисом  $B = 250$  мм та відстанню від знімальної камери до сітки  $Z = 2500$  мм (рис. 2) виконано штучне дощування впродовж 40 с. Після змиву проводилося аналогічне знімання (рис. 3).

Через певний час виконувалося нівелювання поверхні піскута та його сушка, а після цього подальші знімання при кутах нахилу тестового майданчика  $5^\circ$  і  $2^\circ$ .

Отже, у результаті знімання отримано 12 знімків (6 стереопар).



Рис. 1. Стоковий тест-майданчик

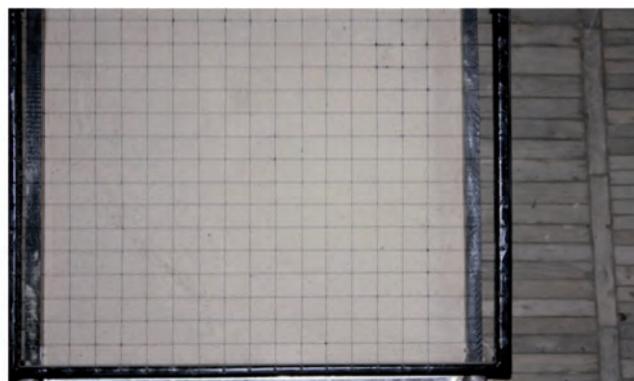
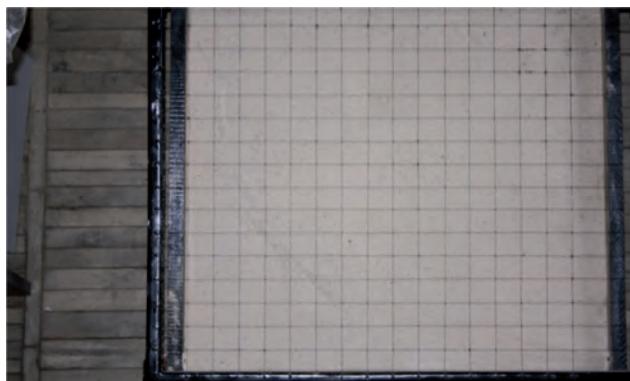


Рис. 2. Лівий та правий знімки до “змиву”

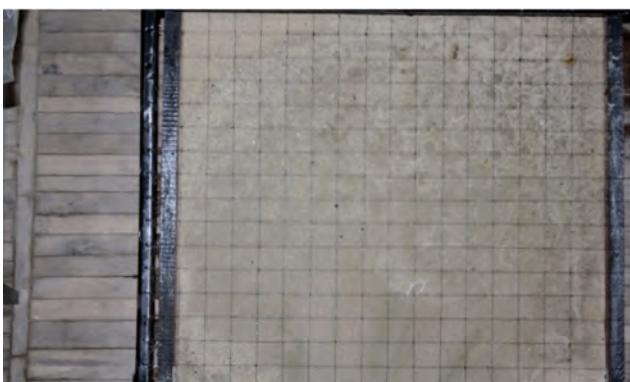


Рис. 3. Лівий та правий знімки після змиву

Для опрацювання растрових зображень використано цифровий фотограмметричний комплекс “Дельта-2”. Наступним етапом було виконання зовнішнього орієнтування за визначеними опорними точками та створення ЦМР у програмному пакеті “Digitals”. У цей пакет входять програми Models.exe, Triada.exe, Geodesy.exe, основна базова програма Ged.exe та деякі інші. Для роботи використано Models.exe та Ged.exe [7].

Після завершення орієнтування порівняно результати попередньої оцінки точності із реальними. Результати для однієї зі стереопар подано у табл. 2.

*Таблиця 2*  
**Результати зовнішнього орієнтування 1 стереопари**

Номери опорних точок	$\Delta X$ , мм	$\Delta Y$ , мм	$\Delta Z$ , мм
1	0,00	-0,13	-0,20
2	0,27	0,27	0,41
3	0,18	-0,18	-1,38
4	0,01	0,48	1,53
5	-0,09	-0,43	0,52
6	0,27	-0,06	-1,38
7	-0,12	-0,10	1,01
8	-0,07	-0,06	0,23
9	-0,17	0,00	-0,79
СКП	0,16	0,25	0,96

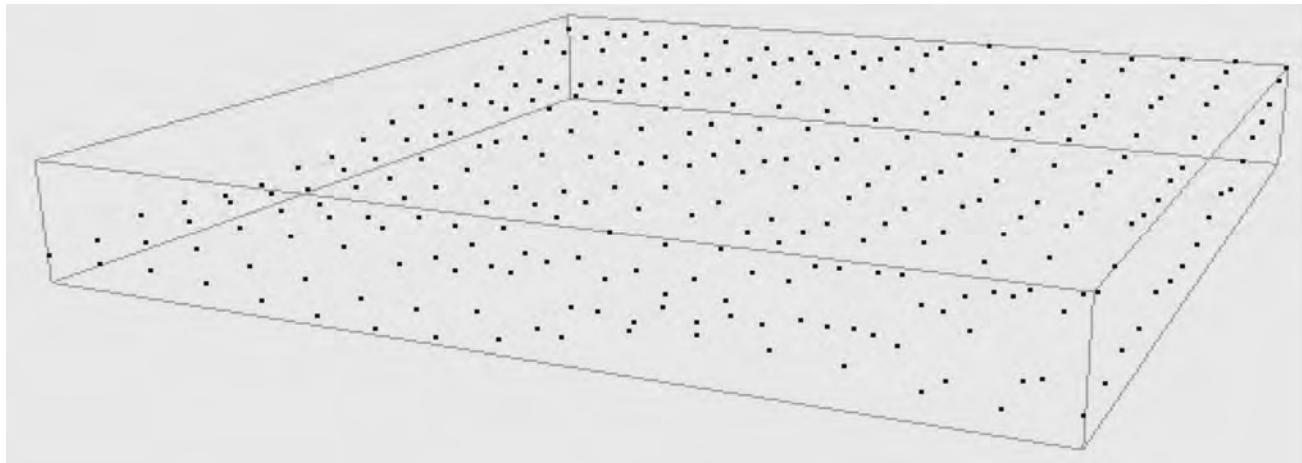
Проводячи порівняльний аналіз результатів орієнтування з апріорною оцінкою точності, необхідно зазначити, що за всіма стреопарами точність не перевищує попередню і становить, відповідно:

$$m_{X_\phi} = 0,24 \text{ мм}, \quad m_{Y_\phi} = 0,33 \text{ мм}, \quad m_{Z_\phi} = 0,82 \text{ мм}.$$

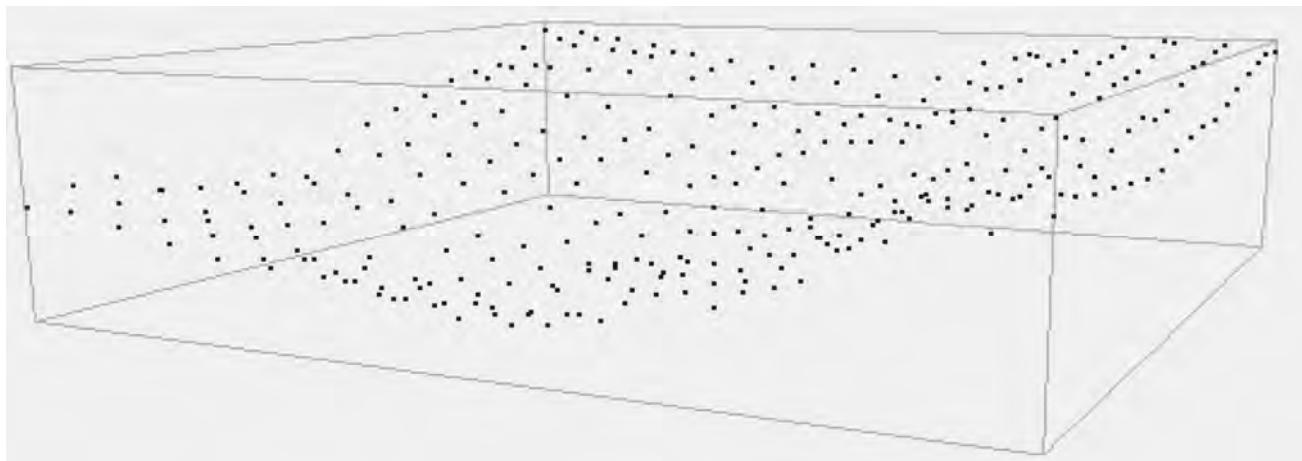
Створення цифрової моделі рельєфу полягало у тому, що вимірна марка візувалась на поверхню піску у кожному квадраті сітки, приблизно в тому самому місці (верхній лівий кут). У результаті отримано ЦМР нульового циклу (до змиву) та першого циклу (після змиву) при нахилах 2°, 5° і 10°. 3D-моделі нульового та першого циклів для нахилу 10° наведено відповідно на рис. 4 та 5.

Процес визначення об'єму виконано в програмі Ged.exe. ЦМР оконтурювали прямокутною рамкою, задавши їй параметр висоти так, що ця висота була більшою від найвищої точки цифрової моделі. Після цього обчислювали умовний об'єм отриманої фігури.

Такі дії було виконано для всіх ЦМР нульового та першого циклів. Результатами є умовні об'єми фігур. Взявши різницю умовних об'ємів нульового та першого циклу, отримали значення істинних об'ємів, які подано у табл. 3.



*Рис. 4. Тривимірний вигляд ЦМР нульового циклу*



*Рис. 5. Тривимірний вигляд ЦМР першого циклу*

**Таблиця 3**  
**Значення об'ємів змитого ґрунту**

$\omega^\circ$	Об'єм нульового циклу $V'$ , см <sup>3</sup>	Об'єм першого циклу $V''$ , см <sup>3</sup>	Реальний об'єм змитого ґрунту $V = V'' - V'$ , см <sup>3</sup>
10	8125,7	9465,0	1339,3
5	13003,1	13386,9	383,8
2	8975,7	9111,9	136,2

Важливою умовою для чистоти експерименту є те, що рамку, якою оконтурили ЦМР до змиву, необхідно скопіювати і вставити у ЦМР після змиву, а не створювати її повторно.

Для визначення коректної оцінки точності об'ємів змитого ґрунту обчислено реальний об'єм піску. Змитий пісок помістили у ємкість, яка має форму зрізаної піраміди. Верхня та нижня основи є прямокутниками. Необхідні параметри цієї ємкості заміряно за допомогою штангенциркуля. Підставивши дані у відповідну формулу, отримали еталонні значення об'єму:

$$V_{10^\circ} = 1332,12 \text{ см}^3; V_{5^\circ} = 379,8 \text{ см}^3; V_2^\circ = 132,3 \text{ см}^3.$$

Відносні похибки об'ємів становили:

$$\frac{m_v}{V} 100 \% (10^\circ) = 0,5 \% ; \quad \frac{m_v}{V} 100 \% (5^\circ) = 1 \% ;$$

$$\frac{m_v}{V} 100 \% (2^\circ) = 2,9 \% .$$

### Висновки

У результаті проведених досліджень зробимо такі висновки:

1. Визначення об'єму при  $10^\circ$  нахилу стокового майданчика не перевищує значення попередньої оцінки точності, що свідчить про можливість застосування запропонованого методу для розв'язання цієї задачі.

2. Стосовно значень оцінки точності для нахилів  $5^\circ$  та  $2^\circ$ , то вони в принципі лежать у межах допусків похибок об'ємів для змивів ( $2\text{--}3\%$ ).

3. Невідповідність похибок визначення об'ємів для  $2^\circ$  та  $5^\circ$  пояснюється тим, що в експериментальних роботах використано не абсолютно сухий пісок, а дещо вологий. Це викликало відповідну просадку піску, а відтак більшу похибку визначення шуканих об'ємів.

4. У майбутньому планується апробація запропонованої методики у польових умовах.

### Література

- Глотов В. Дослідження ерозійної небезпеки ґрунтів детального рівня цифровим наземним стереофотограмметричним методом (частина 1) / В. Глотов, М. Процик // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2012. – № 1. – С.184–187.
- Глотов В.М. Спосіб визначення планових елементів внутрішнього орієнтування, дисторсії, похибок збільшення об'єктиву та положення ПЗЗ-матриці цифрових знімальних камер / В.М. Глотов, О.Д. Пащетник // Геоінформаційний моніторинг навколошнього середовища: GPSiGIS технології: XIV Міжнародний науково-технічний симпозіум, 8–13 вересня 2009 р., м. Алушта (Крим). – С.192–195.

- Кривальцевич С.В. Дистанционное зондирование деградированных почв: авторефер. дис. ... канд. физ.-матем. наук: специальность 25.00.35 – Геоинформатика. – Барнаул, 2005.
- Лисецкий Ф.Н. Современные проблемы эрозионедения / Ф.Н. Лисецкий, А.А. Светличный, С.Г. Черный / под ред. А.А. Светличного. – Белгород: Константа, 2012. – 456 с.
- Процик М.Т. Методи фотограмметричного та картографічного супроводу багаторівневої системи моніторингу ерозійних ґрутових процесів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спеціальність 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія. – Львів, 2012.
- Пузанов Б.С. Методика измерений объемов и площадей по наземным стереофотоснимкам / Б.С. Пузанов, Н.И. Иванов // Труды института "Орггидрострой". – 1959. – 50 с.
- Цифровой фотограмметрический комплекс "Дельта". Программное обеспечение для ориентирования растровых аэрокосмических снимков. Руководство оператора-фотограмметриста и описание программ. Часть 1. – Винница, 2004

### Дослідження ерозійної небезпеки ґрунтів на детальному рівні цифровим наземним стереофотограмметричним методом (Частина 2)

В. Глотов, М. Процик, Д. Жук

Серію експериментально-дослідницьких робіт виконано за допомогою запропонованого способу визначення об'ємів змитих ґрунтів за стереопарою цифрових зображень, отриманих цифровою неметричною знімальною камерою з метою визначення реальної точності способу. Зроблено висновки, що спосіб можна застосовувати і у польових умовах.

### Исследования эрозионной опасности грунтов детального уровня цифровым наземным стереофотограмметрическим методом (Часть 2)

В. Глотов, М. Процик, Д. Жук

Серия экспериментально-исследовательских работ была проведена с помощью предложенного способа определения объемов смытых почв с использованием стереоизображений, полученных цифровой неметрической камерой, с целью определения реальной точности способа. Сделаны выводы, что способ можно применять и в полевых условиях.

### Study on soil erosion hazard on detailed level by digital terrestrial stereophotogrammetric method (Part 2)

V. Hlotov, M. Protsyk, D. Zhuk

The series of experimental researches were implemented using proposed method of determining the volume of eroded soils on stereophotos obtained by non-metric digital camera to determine the real accuracy of the method. Conclusions are that the method can be applied in the field conditions.