

УДК 528.72:616.-073.585

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРОЗІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ҐРУНТІВ НА ДЕТАЛЬНОМУ РІВНІ ЦИФРОВИМ НАЗЕМНИМ СТЕРЕОФОТОГРАМЕТРИЧНИМ 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 ерозії 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 опрацювати 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 переконливо 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 ерозії ґрунтів. У монографії розглянуто методологічні, методичні та прикладні питання ерозієзнавства. Представлено результати багаторічних досліджень водної ерозії ґрунтів, визначено нові підходи до математичного моделювання ерозійних і ґрунтоутворювальних процесів, розрахунку, прогнозу і обґрунтування раціонального використання ерозійно небезпечних земель, виконаних з урахуванням світового досвіду. Наведено й обґрунтовано вирішення різних завдань прикладного ерозієзнавства 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 зеніту за 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, застосовуваної для дослідження характеристик різних ґрунтів. Проведено аналіз похибок вимірювань. Поріг флуктуаційної 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 абсолютного калібрування при цьому становила 1,5–2,5 К на всіх довжинах хвиль. Кожен цикл починався після штучного зрошення або випадання природних опадів і закінчувався, 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 щільності 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 актуальна, особливо з погляду створення різноманітних моделей для дослідження ерозії ґрунтів.

Невирішені частини загальної проблеми

Частина 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 стоконап-
ряним лотком та стокоприймальним резервуаром, а
також її калібрування;

– створення стендового майданчика для засипан-
ня ґрунту з вивідними гвинтами для імітації кутів
нахилу;

– визначення об’ємів змитого ґрунту в лаборатор-
них 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 мож-
ливість реалізації запропонованого способу. По-
перше, визначимо, з якою точністю можливо обчис-
лити координати точок на місцевості, використавши
для цього формули нормального випадку знімання,
оскільки фактично ми імітували цей випадок:

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

Продиференціювавши їх, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} dX_{\phi} &= \frac{x_l}{p} dB + \frac{B}{p} dx_l - \frac{x_l B}{p^2} dp \\ dY_{\phi} &= \frac{y_l}{p} dB + \frac{B}{p} dy_l - \frac{y_l B}{p^2} dp \\ dZ_{\phi} &= -\frac{f}{p} dB - \frac{B}{p} df + \frac{fB}{p^2} dp \end{aligned} \right\} \cdot \quad (2)$$

Перейдемо до середньоквадратичних похибок:

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

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_l, y_l – 11 мм, 7 мм – координати крайніх
точок знімка; $p = 7$ мм – середнє значення повз-
довжнього паралаксу; $f = 50$ мм – фокусна відстань
знімальної камери; $m_B = 0,1$ мм – похибка вимі-
рювання базису знімання; $m_{x_l}, m_{y_l}, m_p = 0,005$ мм –
середньоквадратичні похибки вимірювання координат
знімка x_l, y_l та паралаксу p на ЦФС “Дельта-2”;
 $Y_{\phi} = 2500$ мм – відстань до об’єкта знімання.

Підставивши ці значення у формулу (3), обчис-
лимо 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 остаточною величиною є об’єм ґрунтів, то
розрахуємо відносну похибку об’єму за формулою [6]:

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

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

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

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

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

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

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

$M_{\text{сеп.с}}^2$ – СКП значення перевищень, обчислимо за
формулою:

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

де $h=7$ мм – середнє перевищення; $L=210$ – кількість
комірок у рамці; $m_{\Delta z} = 0,007$ мм – похибка вимірів
перевищення 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 експе-
рименту. Лабораторна модель дослідження являє
собою стоковий тест-майданчик, який складається з
піддона, в якому міститься аналог ґрунту (в цьому
випадку дрібнозернистий пісок об’ємом $V = 40000 \text{ см}^3$),
стоконапного і стокоприймального пристроїв
(рис. 1). Окрім цього, на бортах майданчика встанов-
лено 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 зафіксований у місцях перетину з рамою та між собою за допомогою пайки. Це утворило сітку, яка є основним елементом у дослідженні. Розміри сталеві 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 піску та його сушка, а після цього подальші знімання при кутах нахилу тестового майданчика 5° і 2° .

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

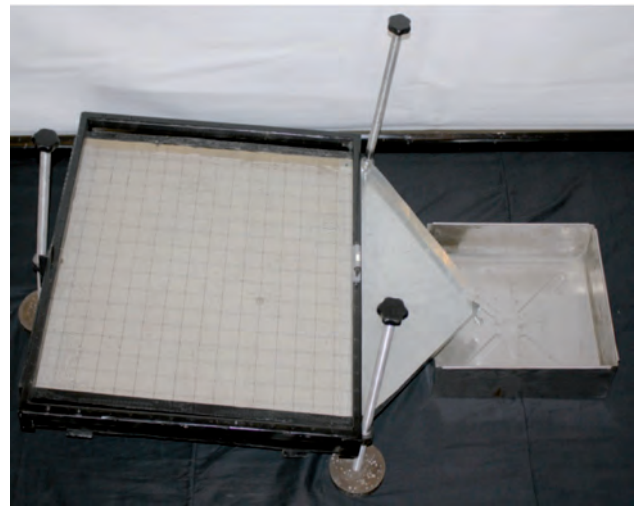


Рис. 1. Стоковий тест-майданчик

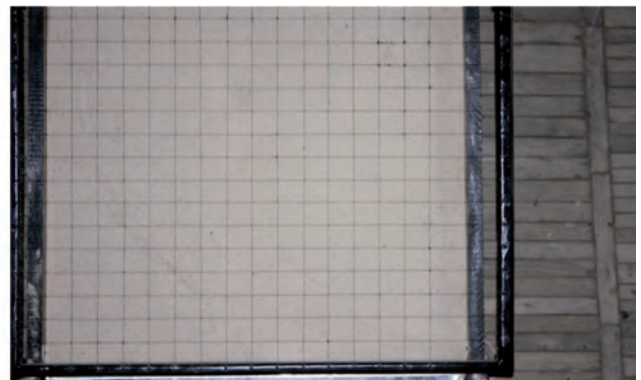
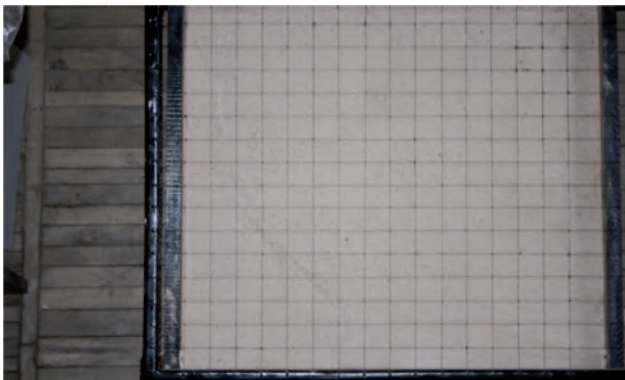


Рис. 2. Лівий та правий знімки до “змиву”

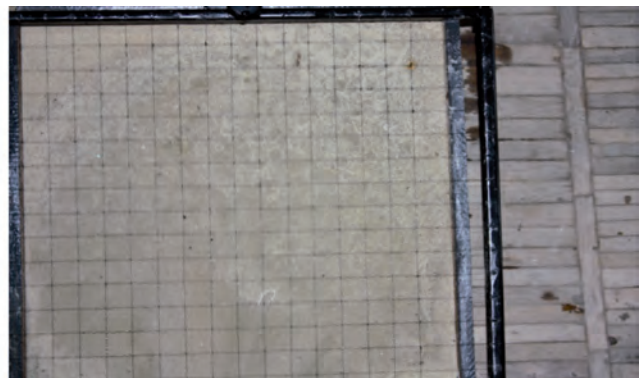
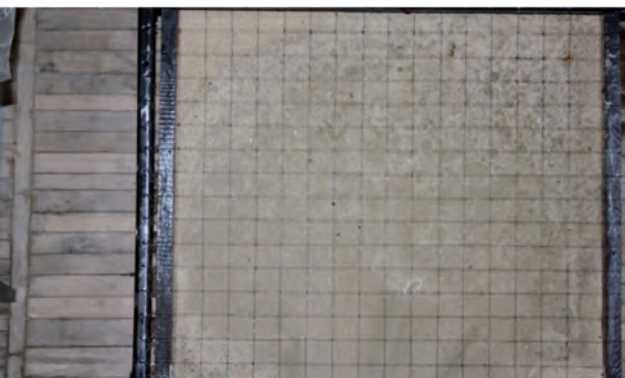


Рис. 3. Лівий та правий знімки після змиву

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 | ΔX , мм | ΔY , мм | ΔZ , 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 апіорною оцінкою точності, необхідно зазначити, що за всіма стереопарами 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.

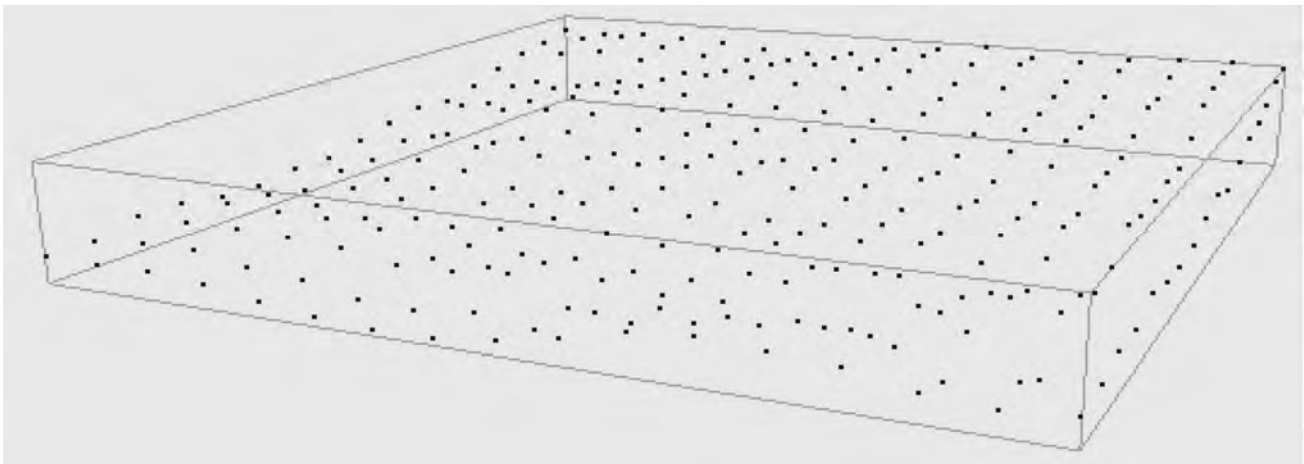


Рис. 4. Тривимірний вигляд ЦМР нульового циклу

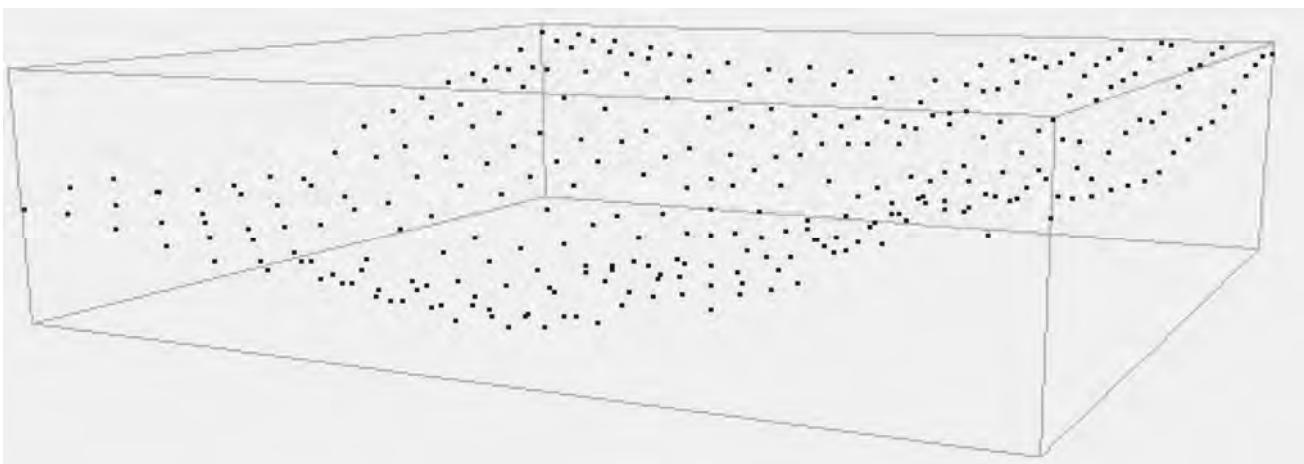


Рис. 5. Тривимірний вигляд ЦМР першого циклу

Таблиця 3

Значення об'ємів змитого ґрунту

| ω° | Об'єм нульового циклу V' , см ³ | Об'єм першого циклу V'' , см ³ | Реальний об'єм змитого ґрунту $V = V'' - V'$, см ³ |
|----------------|--|---|--|
| 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:

$$V_{10^\circ} = 1332,12 \text{ см}^3; \quad V_{5^\circ} = 379,8 \text{ см}^3; \quad V_{2^\circ} = 132,3 \text{ см}^3.$$

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° 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° та 2° , то вони в принципі лежать у межах допусків похибок об'ємів для змивів ($2-3 \%$).

3. Невідповідність похибок визначення об'ємів для 2° та 5° 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. Пашетник // Геоінформаційний моніторинг навколишнього 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 эрозии / 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 ґрунтових 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 "Оргэнергострой". – 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 ґрунтов
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 stereoisimages 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.