

РОЗДІЛ VI

Методика геоекологічних і геодезичних досліджень

УДК 528.852:631.459

В. М. Мельник – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру Волинського національного університету імені Лесі Українки;

В. П. Мендель – аспірант Волинського національного університету імені Лесі Українки

Геометричне дослідження ерозійних процесів методом триплетної квазіконвергентної фототопографії

*Роботу виконано на кафедрі геодезії,
землевпорядкування та кадастру
ВНУ ім. Лесі Українки*

Запропоновано досліджувати ерозію ґрунту із застосуванням методу триплетної квазіконвергентної фототопографії. Розроблено методику організації польового геостационару, обґрунтовано поетапність польових і камеральних робіт. Дано теорію методу визначення елементів внутрішнього та зовнішнього орієнтування квазі- й реальних знімків. Виконано практичну апробацію методу та емпірично отримано його точність.

Ключові слова: ерозія, цифрова фотограмметрія, стереознімання, квазізнімки, триплетна модель.

Мельник В. Н., Мендель В. П. Геометрическое исследование эрозионных процессов методом триплетной квазиконвергентной фототопографии. Предлагается исследовать эрозию почвы с применением метода триплетной квазиконвергентной фототопографии. Разработана методика организации полевого геостационара, обосновано поэтапность полевых и камеральных работ. Дана теория метода определения элементов внутреннего и внешнего ориентирования квази- и реальных снимков. Выполнена практическая апробация метода и эмпирически получена его точность.

Ключевые слова: эрозия, цифровая фотограмметрия, стереосъемка, квазиснимки, триплетная модель.

Melnyk V. M., Mendel V. P. Geometrical Research of Erosive Processes Using the Method of Triplet Quasiconvergent Phototopography. There is proposed to study soil erosion using the method of triplet quasiconvergent phototopography. The method of organization of field geo permanent establishment was elaborated, the grounds of phasing field and laboratory works were accomplished. There was given a theory of method for inner and outer orientation of quasi- and real photographs determination. There was done practical approbation of the method and its precision was received empirical.

Key words: erosion, digital photogrammetry, stereophotography, quasiphotos, triplet model.

Постановка наукової проблеми та її значення. Сьогодні в Україні спостерігається інтенсивний розвиток ерозійних і дефляційних процесів ґрунтового покриву [1; 2; 3]. Причина цього – неправильне господарське використання земель без урахування природних умов і загальних закономірностей водного й вітрового режиму ґрунтів, знищення природного рослинного покриву, погіршення інфільтраційної та водопоглинаючої властивостей ґрунтів і їх протиерозійної стійкості [3; 4]. Для запобігання таким негативним процесам потрібне їх більш поглиблене дослідження, застосовуючи досконаліші технології. Використання необхідних дієвих заходів для відновлення й збереження довкілля є одним з актуальних завдань сьогодення. У такому аспекті можуть бути з успіхом використані найновіші досягнення в галузі прикладної цифрової фотограмметрії, яка дає змогу отримувати потрібну прецизійну кількісну інформацію ерозійних процесів.

Такі дослідження відповідають тематиці загальнодержавної концепції «Національної програми охорони земель» та тісно пов'язані з держтемою «Дослідження сучасного стану та розробка засобами ГІС-технологій і РЕМ-мікроскопії засад раціонального землекористування ерозійно-деградованих земель Волинської височини», що виконується на кафедрі геодезії, землевпорядкування та кадастру Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки.

Аналіз останніх досліджень із цієї проблеми. Ерозійні процеси, зважаючи на поширеність та все більшу руйнівну дію на сільськогосподарські угіддя, належать до таких, що досліджуються в системі багатьох дисциплін. У працях вітчизняних та зарубіжних науковців багато уваги приділяється теоретичному обґрунтуванню формування екологічно збалансованих ландшафтів при проявах ерозії (С. Ю. Булигін) [2]; інтегральному застосуванню GPS- та ГІС-технологій, достовірній і надійній інтерпретації отримуваних результатів (О. О. Світличний) [4]; моніторинговим дослідженням навколишнього довкілля на основі дистанційних даних (М. Т. Процик) [8]. У сучасному світі науки в комплексі знання фізичної суті процесу потрібно враховувати структурні елементи на рівні мікрочасток. Дослідження водної й вітрової ерозії ґрунтів у цьому напрямі, тобто методами прикладної фотограмметрії мають важливе практичне значення (В. М. Мельник; А. Ф. Варфоломєєв) [9; 10].

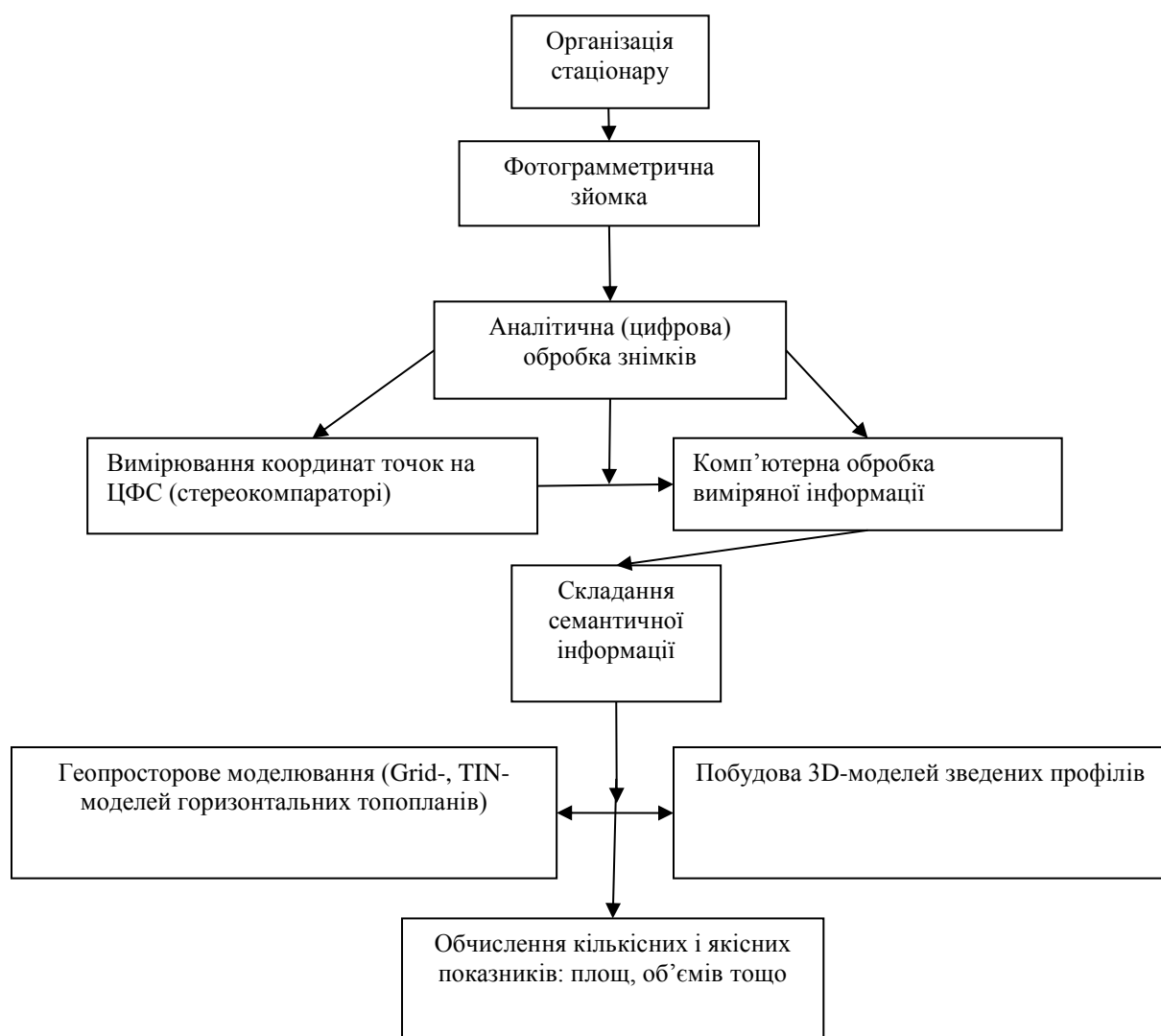


Рис. 1. Програма опрацювання геостаціонарних спостережень.

Мета статті – розробка теоретико-методологічних засад оцінки площинного змиву ґрунту на ключових стаціонарах, розробка теорії триплетного стереознімання з використанням квазі- та реальних стерео знімків. **Завданням** є отримання кількісних і якісних показників процесу площинного змиву, що відбувалися протягом досліджуваного періоду, і можливості прогнозування водної ерозії.

Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів дослідження.
Організація стаціонару. Для вивчення інтенсивності площинної ерозії доцільно застосовувати повторні циклічні спостереження на спеціально організованих стаціонарних ключових ділянках [2; 3]. Оптимальну програму польових і камеральних робіт на такому стаціонарі відображено на рис. 1.

Визначення просторових координат опорних знаків (точок) та станцій спостережень пропонується здійснювати із застосуванням GPS-технологій. Станції для отримання реальних і квазізнімків потрібно закріплювати довготривалими знаками й вибирати з урахуванням умов місцевості. Можлива схема організації польового стаціонару показана на рис. 2.

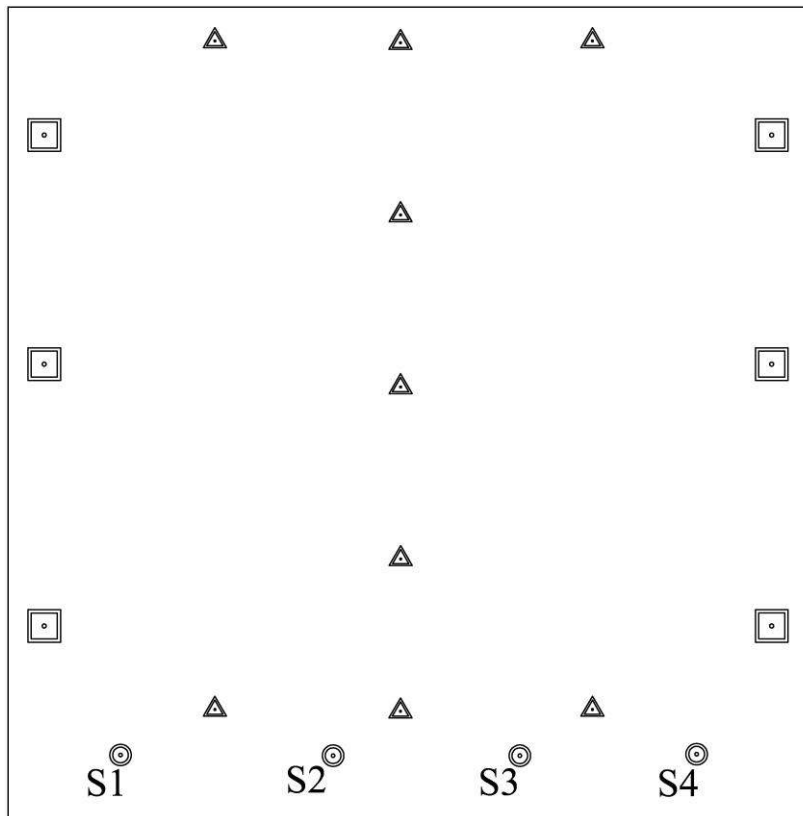


Рис. 2. Схема організації польового стаціонару дослідження ерозії ґрунту:

- ◻ – знаки довготривалого закріплення;
- △ – знаки тимчасового закріплення;
- ⊙ – станції квазіконвергентної зйомки.

Теорія методу. Теоретичні розрахунки показують, коли потрібно оцінювати динамічні процеси малої інтенсивності, тобто малі зміни ерозії за порівняно короткі проміжки часу, то застосування методики класичної обробки наземних знімків на базі функціональної моделі нормального випадку зйомки виявляється недостатнім за точністю.

Тому для підвищення точності фотограмметричних визначень пропонується застосовувати строгий метод обробки знімків через побудову функціональної математичної моделі об'єкта за умови триплетного стереознімання [5; 7]. Для надійної побудови таких моделей слід мати на їхніх краях мінімум 4–5 опорних точок.

Основна перевага побудови триплетної моделі об'єкта полягає в тому, що для зйомки можна застосовувати загальний випадок, через що значно спрощуються польові роботи та підвищується продуктивність [12; 13].

Пропонується триплет-зйомку виконувати із застосуванням реальних і квазізнімків, отримуваних аналітично [7]. Фотограмметрична обробка здійснюється методами аналітичної й цифрової наземної фотограмметрії [14]. Теорія методу складається із двох блоків: формування квазізнімків і визначення параметрів орієнтування реальних знімків на основі математичних співвідношень, що виникають при обробці триплет-знімків [12].

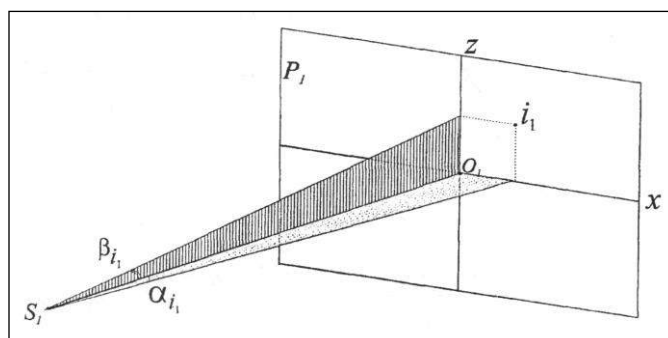


Рис. 3. Схема формування квазізнімків

Для утворення стереопари квазізнімків із точок S_1 і S_2 (рис. 3) вимірюють горизонтальні й вертикальні кути на замарковані або характерні контури об'єкта та, задавшись довільною фокусною відстанню f , обчислюють їх фотокоординати за формулами:

$$x_{i_1} = f \operatorname{tg} \alpha_{i_1}, x_{i_2} = f \operatorname{tg} \alpha_{i_2}, z_{i_1} = f \operatorname{tg} \beta_{i_1} / \cos \alpha_{i_1}, z_{i_2} = f \operatorname{tg} \beta_{i_2} / \cos \alpha_{i_2}, \quad (1)$$

де $\alpha_{i_1}, \beta_{i_1}, \alpha_{i_2}, \beta_{i_2}$ – горизонтальні й вертикальні кути, поміряні відповідно із першої та другої точок стояння інструмента.

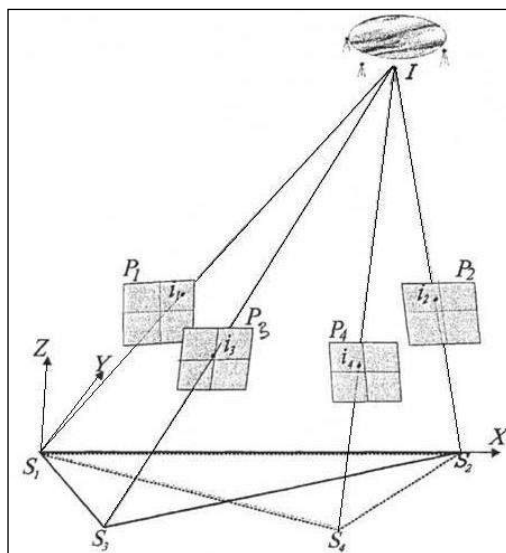


Рис. 4. Триплет квазіконвергентних знімків:
 P_1, P_2 – квазізнімки; P_3, P_4 – стереопара знімків;
 P_1, P_2, P_3 – I триплет; P_1, P_2, P_4 – II триплет.

Умови, потрібні для формування триплету, забезпечуються при зйомці, для чого оптичні осі камер направляються таким чином, щоб квазізнімки P_1 і P_2 разом із реальним знімком P_3 (або P_4) утворили замкнутий триплет конвергентних знімків (рис. 4). Математичне розв'язання задачі ґрунтується на умові компланарності векторів, на основі яких складається система лінеаризованих рівнянь поправок для визначення невідомих параметрів знімків.

Якщо знімки взаємно орієнтовані, то центри проєкцій S_1 і S_2 і відповідні точки m_1 і m_2 лежать в одній площині. Це значить, що просторові координати цих точок задовольняють умову (2):

$$P(S_1, S_2, m_1, m_2) = \begin{pmatrix} X_{S_1} & Y_{S_1} & Z_{S_1} & 1 \\ X_{S_2} & Y_{S_2} & Z_{S_2} & 1 \\ X_{S_3} & Y_{S_3} & Z_{S_3} & 1 \\ X_{S_4} & Y_{S_4} & Z_{S_4} & 1 \end{pmatrix} = 0. \quad (2)$$

Для визначення невідомих елементів внутрішнього й зовнішнього орієнтування реальних знімків (P_3, P_4) отримується система рівнянь на основі лінеаризації виразу (2). Загалом така система рівнянь має вигляд:

$$\sum_1^n A_i \delta x_i + l_i = v_i, \quad (3)$$

де A_i – часткові похідні по відповідних змінних $A_i = \frac{\partial P}{\partial x_i}$.

Відповідно до рис. 4, за початок координат прийнято точку S_1 й елементи внутрішнього орієнтування квазізнімків P_1 і P_2 дорівнюють нулю. При взаємному орієнтуванні квазізнімків P_1 і P_2

базис має дійсне значення, визначене в процесі підготовчих робіт. Координати головних точок знімків P_1 і P_2 вважають рівними нулю, а параметри калібрування знімків – відомими.

Реальні знімки P_3 і P_4 мають спотворення за радіальну та тангенціальну дисторсії з коефіцієнтами K_1, K_2, K_3, P_1, P_2 [14]. З урахуванням умов отримання квазізнімків (P_1 і P_2) і дисторсії реальних знімків (P_3, P_4) отримано рівняння поправок для триплету:

$$\begin{aligned} b_p'' \delta Y_{S_2} + c_p'' \delta Z_{S_2} + d_p'' \delta \alpha_2 + e_p'' \delta \omega_2 + f_p'' \delta \kappa_2 + l_p &= v_p, \\ a_g \delta x_0 + b_g \delta z_0 + c_g \delta f + d_g \delta K_1 + e_g \delta K_2 + f_g \delta K_3 + r_g \delta P_1 + l_g \delta P_2 + b' \delta Y_{S_2} + c' \delta Z_{S_2} + d' \delta \alpha_2 + \\ + e' \delta \omega_2 + f' \delta \kappa_2 + a_g'' \delta X_{S_3} + b_g'' \delta Y_{S_3} + c_g'' \delta Z_{S_3} + d_g'' \delta \alpha_3 + e_g'' \delta \omega_3 + f_g'' \delta \kappa_3 + l_g &= v_g, \\ a_r \delta x_0 + b_r \delta z_0 + c_r \delta f + d_r \delta K_1 + e_r \delta K_2 + f_r \delta K_3 + r_r \delta P_1 + l_r \delta P_2 + a_r'' \delta X_{S_4} + b_r'' \delta Y_{S_4} + c_r'' \delta Z_{S_4} + \\ + d_r'' \delta \alpha_4 + e_r' \delta \omega_4 + f_r' \delta \kappa_4 + l_r &= v_r, \end{aligned} \quad (4)$$

де p – індекс відповідно до стереопари, утвореної з квазізнімків, отриманих із центрів S_1 і S_2 ; g – індекс відповідно до стереопари, утвореної з квазізнімків, отриманих із центрів S_2 і S_3 ; r – індекс відповідно до стереопари, утвореної з квазізнімків, отриманих із центрів S_1 і S_4 .

За відомих параметрів калібрування та елементів зовнішнього орієнтування квазізнімків P_1 і P_2 , рівняння поправок матимуть такий спрощений вигляд:

$$\begin{aligned} a_g'' \delta X_{S_3} + b_g'' \delta Y_{S_3} + c_g'' \delta Z_{S_3} + d_g'' \delta \alpha_3 + e_g'' \delta \omega_3 + f_g'' \delta \kappa_3 + l_g &= v_g, \\ a_r'' \delta X_{S_4} + b_r'' \delta Y_{S_4} + c_r'' \delta Z_{S_4} + d_r'' \delta \alpha_2 + e_r' \delta \omega_2 + f_r' \delta \kappa_2 + l_r &= v_r. \end{aligned} \quad (5)$$

Визначаються невідомі параметри незалежно для лівого й правого знімків стереопари, для чого достатньо виконати вимірювання координат семи замаркованих точок [6], кожна з яких дасть змогу скласти три рівняння типу (4) або (5). На основі розв'язку отриманої системи рівнянь визначають елементи внутрішнього та зовнішнього орієнтування реальних знімків, а також за наявності додаткових опорних точок – коефіцієнти радіальної й тангенціальної дисторсії. Знайдені значення використовують як установчі під час обробки цифрових стереопар наземних знімків на ЦФС.

В узагальненому вигляді залежність між невідомими параметрами та поміряними величинами у векторній формі можна представити так:

$$\bar{r} = \bar{r}_0 + M^{-1} A^{-1} (\bar{R} - \bar{R}_0), \quad (6)$$

де \bar{r} – вектор поміряних координат точок на знімку; \bar{R} – вектор відповідних координат точок у натурі; A – матриця повороту; \bar{r}_0, \bar{R}_0 – вектори початку координатних систем; M – масштабний множник.

Такі рівняння (6) складаються для всіх визначуваних точок. При цьому зауважимо, що початкові значення лінійних елементів зовнішнього орієнтування знімків X_S, Y_S, Z_S доцільно визначати зі GPS-вимірювань.

Експериментальні результати. На основі триплет-фотограмметричного стереознімання отримується потрібна цифрова метрична інформація на експериментальні ділянки. Це дає загальну характеристику протікання площинної ерозії, що робить можливим отримання низки кількісних і якісних показників. Як приклад на рис. 5 показано крупномасштабний топоплан (1:500) із суміщеними горизонталями.

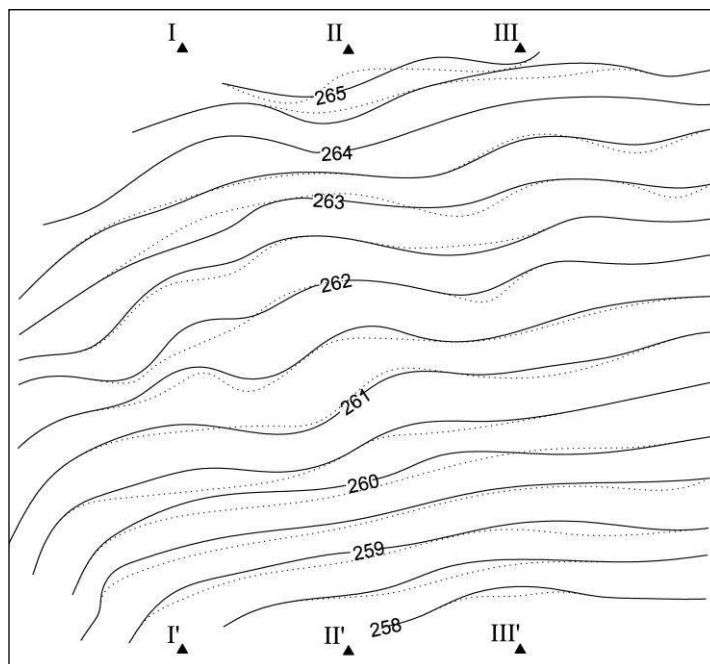


Рис. 5. Фрагмент топоплану із суміщеними горизонталями ерозійнонебезпечного схилу геостационару (суцільні горизонталі станом на 01.03.2011 р.; крапками – станом на 01.09.2012 р.)

Суміщені профілі (рис. 6) повторних спостережень дають достатньо повну картину про геометричні зміни досліджуваної ерозії. За суміщеними профілями можна обчислити середні висоти змін, а потім об'єми змитого ґрунту, що дасть змогу судити про інтенсивність ерозійного процесу як у локальному місці, так і в межах усієї ділянки.

Важливим фактором є надійність використовуваного методу, тобто з якою точністю отримуються визначувані параметри. Математико-стохастична модель дає інформацію про їх точність. Точність побудови фотограмметричної моделі – триплету – була детально досліджена за допомогою математичного моделювання. Оптимальний варіант розв'язання задачі отримано при наявності восьми опорних точок, розміщених у вузлових зонах об'єкта.

Проте для попередньої оцінки точності методу достатньо провести обчислення за такими спрощеними формулами (7):

$$\left. \begin{aligned} m(X, Z) &= 2(Y/f)m(x, z)_0; \\ m(Y) &= (Y/b)m(x, z)_0, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де $m(X, Z) = m(S)$ – середньоквадратична похибка положення точок у площині XZ або довжин ліній; $m(Y)$ – середньоквадратична похибка відстаней або глибин; $m(x, z)_0$ – середньоквадратична похибка вимірювання координати на знімках, які при вимірюванні на стереокомпараторах дорівнюють 10 мкм.

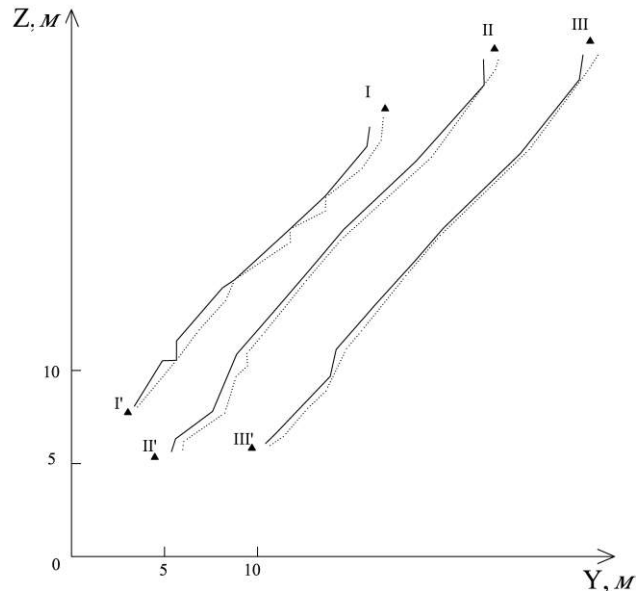


Рис. 6. Характеристика динаміки площинної ерозії ґрунту суміщеними профілями

Отримана за цими формулами абсолютна точність характеризує деформацію визначуваних точок відносно геодезичної опори. Зауважимо, що внутрішня та взаємна точності зазвичай бувають у 1,5–2 рази вищими.

Емпірична точність у масштабі знімків аналітичної колінеарної моделі триплету така: $m(x, z)$ – 16 мкм; $m(Y)$ – 28 мкм; $m(x, z)_0$ – 8 мкм; відношення $mY/m(x, z)$ – 1,8; відношення Y/B – 4; число контрольних точок – 8.

Висновки та перспективи подальших досліджень. На основі виконаних експериментальних робіт можна зробити висновок, що для вивчення площинного ерозійного процесу навіть малої інтенсивності за розмірами доцільно застосовувати запропоновану нами фотограмметричну технологію. Цей метод з успіхом може бути застосований на регіональному рівні, де не повною мірою можливе повноцінне використання матеріалів дистанційного зондування.

Список використаної літератури

1. Амромин П. Д., Трубина Л. К. Определение кинематических параметров моделей космических аппаратов методом моностробоскопической схемки / П. Д. Амромин, Л. К. Трубина // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1992. – № 2. – С. 30–38.
2. Булыгин С. Ю. Формирование экологически сбалансированных ландшафтов: проблема эрозии / С. Ю. Булыгин, М. А. Неаринг. – Харьков: [б. и.], 1999. – 272 с.
3. Бурштинська Х. Цифрове моделювання рельєфу для розв'язання прикладних задач / Х. Бурштинська, М. Процик, А. Гукасов // Матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. «Ландшафтознавство : традиції та тенденції» (8–12 верес. 2004 р.). – Л., 2004. – С. 207.
4. Варфоломеев А. Ф. Изучение эрозионных факторов с использованием картографо-фотограмметрического метода : автореф. дис. ... канд. геогр. наук / А. Ф. Варфоломеев. – М., 1997. – 22 с.
5. Глотов В. М. Дослідження ерозійної небезпеки ґрунтів детального рівня цифровим наземним стереофотограмметричним методом (ч. 1) / В. М. Глотов, М. Т. Процик // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – № I (23) – С. 184–187.
6. Дорожинський О. Л. Основи фотограмметрії / Дорожинський О. Л. – Л. : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2003. – 214 с.
7. Дубиновский В. Б. Калибровка снимков / Дубиновский В. Б. – М. : Недра, 1982. – 218 с.
8. Журкин И. Г. Фотограмметрическая обработка данных дистанционного зондирования при оценке экосистем / И. Г. Журкин, Л. К. Трубина // Исследования Земли из космоса. – 2001. – № 3. – С. 33–39.
9. Книжников Ю. Ф. Компьютерная система для измерения цифровых стереопар при решении нетопографических задач в научных исследованиях / Ю. Ф. Книжников, Р. Н. Гельман // Геодезия и аэрофотосъемка. – 1993. – № 4. – С.137–149.
10. 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.
11. Лисецкий Ф. Н. Пространственно-временная организация агроландшафтов / Лисецкий Ф. Н. – Белгород : Изд-во Белгород. ун-та, 2000. – 302 с.
12. Мельник В. М. Морфолого-спектральна оцінка параметрів гідромеханічної моделі ерозії ґрунту / В. М. Мельник, В. П. Мендель, В. Ф. Радзій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – № I (23) – С. 188–192.

13. Світличний О. О. Основи геоінформатики : навч. посіб. / О. О. Світличний, С. В. Плотницький. – Суми : ВТД «Університ. кн.», 2006. – 291 с.
14. Цифровая фотограмметрия: Обзор программных средств // ГИС-Обозрение. – 1998. – № 1. – С. 10–15.

Адреса для листування:

м. Луцьк, вул. Кравчука, 36,
кафедра геодезії, землевпорядкування
та кадастру, електронна пошта:
mendel-vadm@rambler.ru.

Статтю подано до редколегії
15.10.2012 р.