

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОЇ МОРФОЛОГІЇ ПІД ЧАС ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА МАТЕРІАЛАМИ АЕРОФОТОЗЙОМКИ

Мета. Встановлення планового розподілу ерозійних “плям” на сільськогосподарських землях на основі опрацювання бінарних зображень матеріалів аерофотознімання із застосуванням методів морфолого-планіметричного аналізу. **Методика.** Запропонована методика ґрунтується на застосуванні нелінійних операторів, які математично описуються теоретико-множинним формалізмом. Математична морфологія використовує два основних морфологічні фільтри, які можна представити як послідовні комбінації двох етапів аналізу зображення на основі використання базових морфологічних операторів: стиснення і розширення. **Результати.** Для отримання максимальних характеристик зображення запропоновано опрацювати в такій послідовності: бінаризація, сегментація та морфолого-планіметричні визначення. Зміст бінаризації полягає у тому, що світлі плями, які показують вихід ґрунтовірних порід на поверхню можна відділити за відомим методом проф. В. М. Соколова з послідовним розбиттям пікселів. Такий процес є найвживанішим у цифровій фотограмметрії. Поданий відповідний математичний апарат. Наступним етапом опрацювання бінарного зображення було виділення суміжних границь та ділянок шляхом сегментації методом Лапласа. У такому разі оцінено дві різні контрастності областей А і В. Для встановлення границь їхнього поділу оцінюються знаки другої похідної перепаду контрастності. Запропоновано здійснювати сегментацію згідно з теорією графів. Ілюстрацію такої сегментації представлено графічно. На третьому етапі опрацювання проводяться морфолого-планіметричні визначення на досліджуваному зображенні з використанням піксельних масок розміром 2×2 . Як результат можна обчислити статистичні розподіли плям на аерофотознімках за площею, периметром та фактором форми. **Наукова новизна.** Запропонована методика поетапного опрацювання аерознімків ґрунтується на використанні методу бінаризації та сегментації, які дають змогу отримати чіткіше зображення, а відповідно і точніші результати морфолого-планіметричних визначень. **Практична значущість.** За запропонованим алгоритмом були проаналізовані деякі морфометричні характеристики плям на аерофотознімках: площа, периметр та фактор форми. Приклади застосування, що підтверджують універсальність запропонованого методу під час аналізу зображень у мікрофотограмметрії наведено у роботі [Мельник, 2013].

Ключові слова: аерофотознімки, сегментація, піксельна маска, бінаризація, ерозія, морфологічні фільтри.

Вступ

В сучасному ерозієзнавстві значна увага приділяється використанню космо-, аерофотозйомки для дослідження інтенсивності змиву. При цьому найбільше досліджень пов'язано з встановленням просторового розташування деградаційних частин сільськогосподарських угідь на основі аналізу різночасових спектрозональних або панхроматичних знімків [Замятін А.В., Zhang, Y., 2004; Процик М.Т., 2012]. Результатом обробки космознімків є синтезоване зображення, що демонструє зміни, які відбулись в агроландшафті під впливом антропогенної і природної складової деградації. Прикладом такої роботи є праця [Процик М.Т., 2012; Сальніков І.І., 2013]. Про те не менш цікавим є використання бінарних зображень [Тумська О.В., 2004] для аналізу динаміки ерозійних процесів.

Математичним апаратом в таких дослідженнях є морфологічний аналіз зображень, який ґрунтується на цифрових алгоритмах обробки [Визильтер Ю.В., 2009; Мельник В.М., 2009; Розенфельд А., 1972; Sergeev V., 1984]. Актуальним та важливим завданням є використання кількох методів аналізу з метою їх операційного порівняння та рівня достовірності отриманих результатів.

Мета

Встановлення планового розподілу ерозійних „плям” на сільськогосподарських землях на основі опрацювання бінарних зображень матеріалів аерофотознімання із застосуванням методів морфолого-планіметричного аналізу. Ключові принципи застосування методів математичної морфології.

Методика

Методика обробки цифрових зображень із застосуванням математичної морфології була запропонована в роботах [Setta J., 1992; Шостак А.В., 2011]. Дана методика базується на застосуванні нелінійних операторів, які математично описуються теоретико-множинним формалізмом. Математична морфологія використовує два основних морфологічні фільтри, які можна представити як послідовні комбінації двох етапів аналізу зображення на основі використання двох базових морфологічних операторів: стиснення і розширення. Наприклад, застосуванням групи трансляцій (зсувів) можна встановлювати операцію морфологічного розкриття зображення A за структурованими елементами B :

$$O(A, B) = \cup_{\langle x, y \rangle} \{B(x, y) : B(x, y) \leq A\}, \quad (1)$$

де $B(x, y)$ - образ B , що має зсув на вектор $\langle x, y \rangle$.

Можна переконатися, що (1) є морфологічним проектором:

$$O(A, B) = O(O(A, B), B). \quad (2)$$

Такий оператор інваріантний стосовно зсувів. Крім цього цей оператор є монотонним в тому змісті, що:

$$\forall A, B = O(A, B) \leq A. \quad (3)$$

Про те для отримання достовірних результатів необхідно мати зображення з чіткими контурами досліджуваних об'єктів. Для цього пропонується здійснювати опрацювання матеріалів аерофотозйомки в такій послідовності: бінаризація, сегментація та морфолого-планіметричні визначення. Розглянемо детально їх зміст.

1. Бінаризація зображень.

Для отримання параметрів ерозійних „плям” за їх аерознімками потрібно здійснювати процес бінаризації. Такий процес є найбільш вживаним у цифровій фотограмметрії [Дорожинський О.Л., 2008] та в процесі аналізу зображень різного призначення [Молчанова В.С., 2015; Sauvola J., 2000; Yang Y., 2010; Pratikakis I., 2013].

Математична бінаризація здійснюється за такою схемою [Соколов В.Н., 1997]:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow SQ_0; & \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow SQ_1 \\ & \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow SQ_2 \\ & \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow SQ_3 \\ & \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow SQ_4 \\ & \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow SQ_5 \end{aligned} \quad (4)$$

де 1 – піксель, що належить досліджуваній області (пляма); 0 – піксель, що не належить „плямі”; SQ_n – група ізольованих точок досліджуваного об'єкта. Такий алгоритм частково реалізований в програмному продукті „Stiman” та потребував оцінки точності.

Наступний етап опрацювання бінарного зображення полягає у процесі виділення суміжних границь та ділянок шляхом сегментації методом Лапласа.

2. Сегментація зображень.

Сьогодні відомо про значну кількість методів сегментації цифрових зображень [Соколов В.Н., 1997; Марчуков В.С., 2011; Fowlkes C., 2003; Navon E., 2012]. Розглянемо один з таких методів.

Припустимо, що оцінюються дві різної контрастності області A і B . Для встановлення границь їх поділу оцінюються знаки другої похідної перепаду контрастності. Детально цей процес викладений у відповідних довідниках з прикладної математики.

Пропонується здійснювати сегментацію згідно теорії графів [Соколов В.Н., 2002]. Алгоритм такий. Нехай області A відповідає одна вершина графа C_A . У випадку коли області A і B мають

спільну границю, то відповідні вершини C_A і C_B з'єднані єдиним ребром. Спрямування ребер здійснюється за схемою, коли для областей A і B друга похідна за напрямом, перпендикулярна до їх спільної границі і спрямована з A до B та змінює знак з негативного на позитивний, то ребро спрямоване з вершини графа C_A у вершину C_B і навпаки. Приклад такої сегментації проілюстровано на рис. 1.

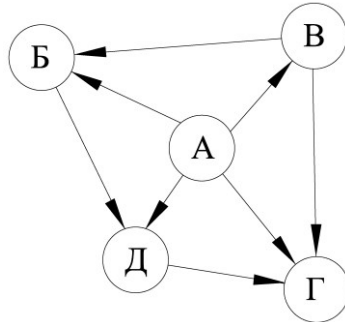


Рис. 1. Графічне представлення алгоритму сегментації

Важливим моментом дослідження процесу вибору оптимального порогу дискримінації є використання декількох його варіантів. Відомо про значну кількість порогових визначень глобального та локального характеру. (р-клітинковий метод, метод мод, метод градієнтної релаксації, метод Осту, Капура, Саху, Вонга, Чоу, Канеко, Фернандо, Монро тощо). Всі ці методи показують інваріантність процесу порогової дискримінації. Простим в реалізації та не менш ефективним за результатом є метод вибору критерія порогового поділу (T). Його визначають за наступною формулою [Кибернетический сборник, 1990]:

$$T = (f_{\min}^0 + f_{\max}^1) / 2 \quad (5)$$

де 0 – об'єкт, 1 – фон.

Такий підхід можна використовувати для кінцевого поділу окремих ділянок зображення, і за необхідності, для перетворення зображення в бінарний вигляд.

З метою більш поглибленого аналізу ерозійного стану орних земель можна представити зв'язок між елементами графа (ребром і вершиною) у вигляді матриці інцидентності. Для цього необхідно розглядати фактори та досліджуваній об'єкт, на який вони впливають, як систему графів. Нехай: $[A, B, C, \dots]$ – сільськогосподарські парцели (земельні ділянки); $[G_1, G_2, G_3, \dots]$ – типи ґрунтів; $[\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots]$ – різновиди агрофонів, $[I_1, I_2, I_3, \dots]$ – протиерозійні інженерні споруди. Звідси типова матриця інцидентності для окремо взятої ділянки та типів ґрунтів матиме вигляд:

$$M_{A,G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Аналогічно складаються матриці інцидентності для інших факторів. Такий підхід дозволяє оптимізувати агроструктуру ерозійного стану орних земель у вигляді відповідних симплексів.

3. Математико-морфологічні визначення планіметричних характеристик.

Після завершення сегментації областей проводять морфолого-планіметричні визначення на досліджуваному зображенні. В роботах [Serra J., 1992; Кендалл М., 1987] приводяться без доведення з позиції теорії геометричної ймовірності наступні формули:

$$A(\text{area}) = 1/8n(SQ_1) + 1/4n(SQ_2) + 7/8n(SQ_3) + n(SQ_4) + 1/4n(SQ_5); \quad (7)$$

$$P = n(SQ_2) + 1/\sqrt{2}[n(SQ_1) + n(SQ_3)]; \quad (8)$$

$$E = 1/4n(SQ_1) - 1/4n(SQ_3) + 1/2n(SQ_5) \quad (9)$$

Тут $SQ_1, SQ_2, \dots, SQ_5$ – піксельні маски розміром 2×2 ; n – кількість пікселів.

За цими формулами можна обчислити статистичні розподіли ерозійних „плям” за площею, периметром та фактором форми тощо. Приклади універсальності запропонованого методу, а також відповідні обчислення приведені нами в роботі [Мельник В., 2013] при опрацюванні РЕМ-знімків поверхні зразків ґрунту.

Точність математико-морфологічних планіметричних визначень. Кількісна інформація отримується в дискретних точках у випадку постійного кроку вздовж рядів та між ними. Для оцінки точності можна використати відому з теорії геометричної ймовірності задачу покриття плоских ґраток [Кендалл М., 1987].

Задамо умову, що на досліджуваній контур накладена регулярна сітка. Кількість розміщених точок у даному контурі буде варіювати, проте початкова їх кількість повторюватиметься щораз, коли сітка буде зміщена так, що нові її точки в точності збігаються з положенням попередніх. Це означає, що число точок у межах контуру є періодичною функцією, яку можна розкласти в ряд Фур'є [Мельник В., 2009].

Нехай лінії растрової сітки паралельні деякій осі x . Виконаємо розділення досліджуваного контура Z зображення відносно осі y на однакові смужки шириною l . Виразивши число смужок n на підставі задачі Бюффона через периметр контуру $p = \pi nl$, отримаємо:

$$\sigma_z^2 = \frac{b^2 lp}{6\pi} \quad (10)$$

Тоді апіорна точність визначення площі складного контуру наступна: при кількості ліній растра (N) – 128, густота растра (b) становить 0,783; при (N) – 256, (b) – 0,387, при (N) – 512, (b) – 0,198.

З проведених розрахунків випливає, що точність вимірів істотно залежить від кількості ліній розкладання, а також від орієнтації досліджуваних ділянок щодо ліній растрової розгортки.

Результати

В якості тестового зразка було досліджено бінарне зображення (рис.2, а). Це, насамперед, було зумовлено тим, що для характеристики такого зображення необхідно проаналізувати тільки дві області кольорів, які чітко відрізняються.

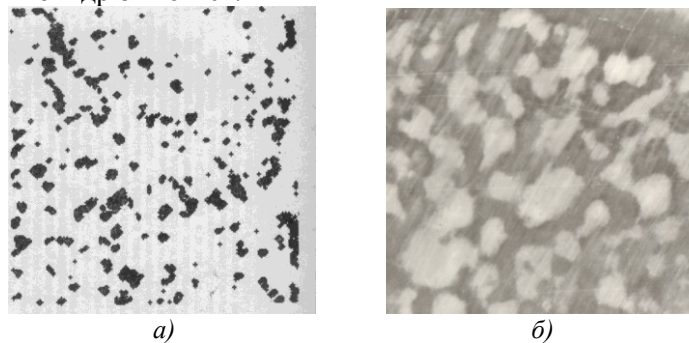


Рис.2. Частина сканованого дослідного матеріалу:
а – тестовий зразок, б – фрагмент ділянки аерофотознімка

Сканування аерофотознімка було здійснено на фотограмметричному сканері “Дельта-2” з роздільною здатністю 1200 dpi при 256 рівнях сірого тону. При цьому параметри аерофотознімання не брались до уваги, зважаючи на мету статті, яка полягала лише у можливості використання методики оперативного дослідження сільськогосподарських земель за бінарними зображеннями. Вибір порогу граничної дискримінації бінарного зображення від якого фактично залежить достовірність отриманих даних здійснювався за запропонованим критерієм порогового поділу T (5). Даний пороговий метод дозволив встановити оптимальний рівень сірого (в нашому випадку 85), після чого зображення перевелось в бінарну форму.

Відповідно здійснено опрацювання даного матеріалу двома способами за допомогою інструментального способу (ПП „Surfer 7”) та запропонованого автоматичного способу визначення характеристик об’єктів на зображенні в програмі „Stiman”.

Алгоритм роботи. Для інструментального опрацювання зображення виконано „ручне” оцифрування „плям” в ПП „Surfer 7”. Це виявилось трудомісткою задачею, загальна кількість

витраченого на такий підхід часу становила 2 год 25 хв. Відповідно отримані такі характеристики: площа та периметр.

Для здійснення аналізу за допомогою програми „Stiman” тест-об’єкт було відскановано в чотирьох рівнях бітової деталізації тобто з різною роздільною здатністю (300, 600, 900, та 1200 dpi).

Практичні розрахунки підтвердили очікуваний результат – із підвищенням кількості пікселів на дюйм зростає точність результуючих обчислень периметру та площі плям. При цьому оптимальним для роботи файлом є зображення роздільною здатністю 900 dpi. В таблиці 1 наведені апостеріорний розрахунок точності такої процедури. Час який при цьому витрачений на опрацювання одного зображення становив 11 хв.

Таблиця 1.

Визначення оптимального рівня бітової деталізації

Відношення роздільної здатності зображень	Теоретичне	Практичне	Співвідношення практичне/теоретичне
300 до 600	2	1,9991	0,9996
300 до 900	3	3,0279	1,0093
300 до 1200	4	4,0378	1,0094

В результаті опрацювання тест-об’єкта було встановлено, що оптимальними характеристиками для досліджень зображень є такі: роздільна здатність 900 dpi, поріг граничної дискримінації бінарного зображення (рівень сірого) – 85. Відхилення „ручного” і автоматичного опрацювання становило 4%, при цьому опрацювання та отримання результатів в програмному продукті „Stiman” в 13 разів оперативніше ніж у випадку інструментального виконання.

Апробація запропонованого підходу. На рисунку 2,б показаний фрагмент аерофотознімка ділянки поля, що піддалась дії водної ерозії на території Вільхівської сільської ради Горохівського району Волинської області. Використавши запропоновану методику, здійснено аналіз відповідного зображення, результатом яких стала побудова ряду гістограм (рис. 3,а,б; рис. 4,а,б; рис. 5,а,б), що характеризують морфологію досліджуваних об’єктів (площа, периметр, фактор форми „плям”).

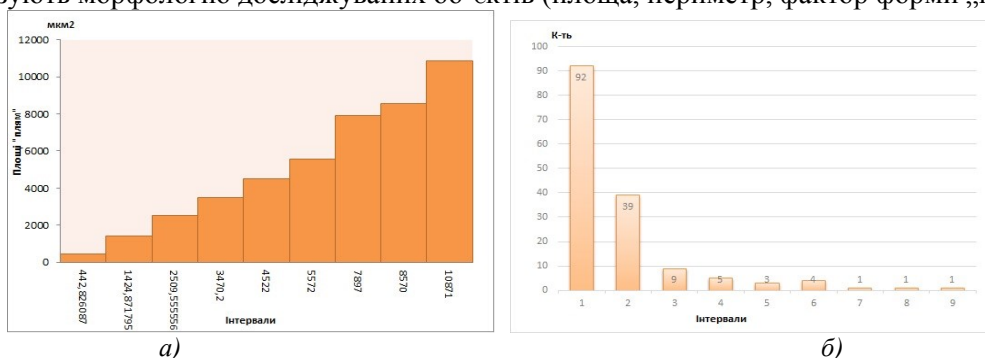


Рис.3. Гістограма розподілу площ (а) та їх кількісна характеристика (б)

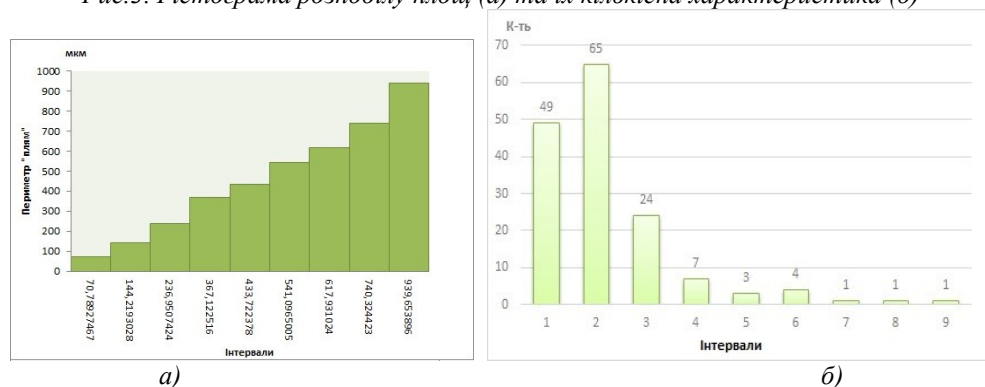


Рис.4. Гістограма розподілу за периметром (а) та його кількісна характеристика (б)

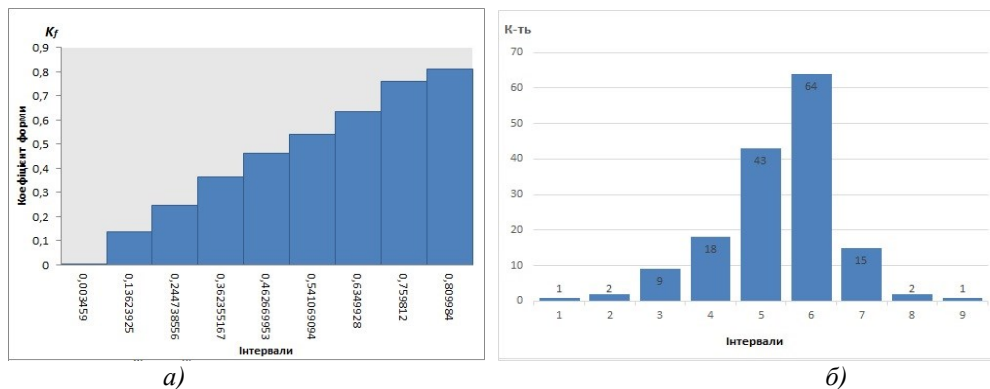


Рис.5. Гістограма розподілу за фактором форми (а) та їх кількісна характеристика (б)

Здійснивши автоматичний піксельний підрахунок площі нами було виявлено, що 38,7% аерофотозображення – це територія, що піддалась впливу водної ерозії. Частина аерознімка, що охоплює дану територію становить площу 2,4520 га, з яких: 0,9489 га – землі котрі мають різну ступінь еродованості (слабку – 0,3013 га, середню – 0,1246 га, сильну – 0,5230 га). Використовуючи архівні дані спостережень за змивом, які були проведені на організованих стаціонарах в межах Горохівського району Поліською філією Інституту ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського підтверджено, що більша частина даної території піддається негативному впливу ерозійних процесів, зокрема, водної ерозії. А виконані нами попередньо польові дослідження площинного змиву ґрунту [Мельник В.М., 2012] формують достатньо повну картину про геометричні зміни досліджуваної поверхні. В нашому випадку об'єми змитого ґрунту при циклічних спостереженнях становили 11,2 т/га/рік (Мельник В.М., Мендель В.П., 2012) та 12,3 т/га/рік (Поліська філія Інституту ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського) відповідно.

Такий підхід дозволяє визначати не тільки сільськогосподарські території котрі піддаються водній чи вітровій ерозії, але при використанні циклічних дистанційних спостережень простежити динаміку змін, що значно спрощує пошук ділянок найбільш підданих деградаційним процесам. Це у свою чергу дозволяє локалізувати найпроблемніші місця та скоординувати подальші детальні дослідження.

Відповідно встановлено, що спосіб визначення основних характеристик площинних об'єктів ерозійно-небезпечних територій (площ, периметрів та форм) за допомогою сучасного програмного забезпечення є більш дієвим і не менш ефективнішим.

Наукова новизна і практична значущість

Використана методика поетапного опрацювання бінарних зображень для дослідження ерозійних процесів за матеріалами аерофотознімання (методи бінаризації, сегментації та математичної морфології). Такий підхід дав змогу отримати більш чітке зображення, а відповідно, і точніші результати морфолого-планіметричних визначень. Методика уможливила отримання швидкої статистичної інформації про стан сільськогосподарських угідь, а, відповідно, скерування подальших досліджень ерозії на значних по площі територіях.

Перспектива таких досліджень полягає в отриманні морфолого-планіметричних характеристик змитих „плям”, які залежать від морфометричних властивостей рельєфу та типу ґрунту. В свою чергу використання комбінованих досліджень дистанційних і наземних методів, в тому числі, РЕМ-досліджень мікроструктури ґрунту, дасть змогу різносторонньо проаналізувати процес ерозії з метою створення нових прогностичних математичних моделей водно-вітрової ерозії та впровадження сучасних протиерозійних заходів.

Висновки

1. Підтверджена принципова можливість застосування відомого методу для аналізу аерофотознімків ерозійно-небезпечної території з метою планування подальших ерозієзнавчих досліджень.

2. Результати опрацювання показали ефективність (оперативність та простота) запропонованого автоматичного методу при аналізі аерофотознімків в бінарній формі. Час опрацювання одного зображення 11 хв. Встановлені локації можливого виходу ґрунотвірних порід на поверхню та, відповідно, орієнтовні площі територій, що піддалися впливу водної ерозії (38,7% від загальної).

3. Подальше застосування отриманих результатів опрацювання зображень матеріалів дистанційного зондування планується використовувати при створенні нових прогнозних математичних моделей водно-вітрової ерозії та впровадження сучасних протиерозійних заходів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Визильтер Ю.В. Теория и методы морфологического анализа изображений / Автореф. дисс. докт. физ.-мат. наук. – Самара, 2009. – 32 с.
- Дорожинський О.Л. Фотограмметрія / О.Л. Дорожинський, Р. Тукай. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка" – 2008. – 332 с.
- Замятин А.В. Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли / А.В. Замятин, Н.Г. Марков – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 176 с.
- Кендалл М. Геометрические вероятности. / М. Кендалл, П. Моран – М.: Наука, 1972. – 192 с.
- Кибернетический сборник. Новая серия Вып. 27. Сб. статей: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 200 с., ил.
- Марчуков В.С. Теория и методы тематической обработки аэрокосмических изображений на основе многоуровневой сегментации. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук 25.00.34 – аэрокосмические исследования земли, фотограмметрия. Москва, МИИГАиК, 2011.
- Мельник В. М. Геометричне дослідження ерозійних процесів методом триплетної квазіконвергентної фототопографії / В. М. Мельник, В. П. Мендель // Науковий вісник Волинського національного університету імені Лесі Українки. 2012. – №18(243) – С. 179-186.
- Мельник В. Деякі питання ідентифікації моделей водної та вітрової ерозії / В. Мельник, В. Радзій, В. Мендель // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва – 2013. – № I (25) – С. 139-144.
- Мельник В.М. Растрово-електронна стереомікрофрактографія: монографія / В.М. Мельник, А.В. Шостак. – Луцьк: ред.-вид. від. ВНУ ім. Лесі Українки, 2009. – 468 с.
- Молчанова В.С. Адаптивный пороговый метод бинаризации растровых изображений технических чертежей / В.С. Молчанова // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2015. – № 2 – С.62-70.
- Процик М. Т. Методи фотограмметричного та картографічного супроводу багаторівневої системи моніторингу ерозійних ґрунтових процесів: автореф. дисертації канд. техн. наук / М. Т. Процик. – Львів, 2012. – 26 с.
- Розенфельд А. Распознавание образов и обработка изображений. – М.: Мир, 1972. – 230 с.
- Сальников И.И. Методы распознавания сложных бинарных изображений на основе построения и следящего анализа / И.И. Сальников // «Искусственный интеллект». – 2013 – № 3. – С.242-252.
- Соколов В.Н. Автоматизированная система морфологического анализа скелетного компонента микроструктуры по РЭМ-изображениям / В.Н. Соколов, Д.И. Юрковец, О.В. Розгулина, В.Н. Мельник // Поверхность. Рентген., синхрон. и нейтрон, исслед., 2002. – № 10. – С. 66-69.
- Соколов В.Н. Метод количественного анализа микроструктуры твердых тел по РЭМ изображениям / В.Н. Соколов, Д.И. Юрковец, О.В. Розгулина, В.Н. Мельник // Зав. лаб., 1997. – № 9. – Т.63. – С. 5-35.
- Тумська О.В. Дослідження автоматичної побудови цифрової моделі рельєфу VLL-методом за матеріалами аерофотознімання / О.В.Тумська, М.Т.Процик, В.Я.Янчак // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2004. – Вип.65. – С.96-104.
- Шостак А.В. Оцінка дисперсних ґрунтів та їх основних реологічних властивостей / Шостак А.В.// Містобудування та територіальне планування. К., – 2011. – Вип. 39. С. 465-475.
- Fowlkes C., Martin D., Malik J. Learning Affinity Functions for Image Segmentation: Combining Patch-based and Gradient-based Approaches. 2003.
- Navon E., Miller O., Averbuch A. Color image segmentation based on adaptive local thresholds. Image and Vision Computing. 2012, no. 23, pp. 69–85.
- Pratikakis I., Gatos B., Ntirogiannis K. Document Image Binarization Contest (ICDAR 2013). ICDAR 2013: 12th International Conference on Document Analysis and Recognition, USA, Washington, 25–28 August, 2013. Washington, 2013, pp. 1471–1476
- Sauvola J., Pietikainen M. Adaptive Document Binarization. Pattern Recognition. 2000, no. 33, pp. 225–236.
- Sergeev V., Sokolov V. Quantitative morphological analysis in a SEM-microcomputer system. J. Quantitative shape analysis of single objects. Journal of microscopy, 1984, V.135, Pt.1, pp. 1–12.
- Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology. London: Academic Press. 1992, pp. 329–341.
- Yang Y. An adaptive logical method for binarization of degraded document images / Y. Yang, H. Yan // Pattern Recognition. – 2010. – Vol. 33. – P. 787–807.
- Zhang Y. Highlight Article: Understanding Image Fusion. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2004, Vol. 70, pp. 657–661.

Надійшла 21.04.2017р.