

**Міністерство освіти і науки України  
Національний університет „Львівська політехніка”**

Мендель Вадим Павлович

УДК 528.4

**Фотограмметричне та картографічне  
забезпечення оцінки стану ерозійних процесів  
(на прикладі Волинського Опілля)**

05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Східноєвропейському національному університеті імені Лесі Українки, Міністерство освіти і науки України

**Науковий керівник**

Доктор технічних наук, професор  
**Мельник Володимир Миколайович**, Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, професор кафедри геодезії, землевпорядкування і кадастру.

**Офіційні опоненти**

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Яковлєв Євген Олександрович**, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, головний науковий співробітник відділу природних ресурсів;

Кандидат технічних наук, доцент  
**Колб Ігор Захарович**, Національний університет „Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, м. Львів, докторант.

Захист відбудеться „21” червня 2018 р. о 12<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.12 у Національному університеті „Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул.Карпінського, 6, ауд.502 II-го навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету „Львівська політехніка” (79013, м.Львів, вул.Професорська, 1).

Автореферат розісланий „11” травня 2018 року.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент

Б.Б. Паляниця

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми досліджень.** Процес ерозії ґрунтів як результат дії природно-антропогенних чинників, що спричиняє деградацію родючого шару, завдає значних екологічних і економічних збитків. Надмірно інтенсивне використання орних земель на схилах призводить до порушення екологічно збалансованого співвідношення площ ріллі, природних кормових угідь, лісів та водойм. Це негативно позначилося на стійкості агроландшафтів і зумовило значне техногенне навантаження на екосферу. Надійне кількісне обґрунтування ґрунтозахисного землеустрою та протиерозійного землеробства неможливо здійснити без детального визначення параметрів, що впливають на процеси ерозії з врахуванням фактичної структуризації землеволодінь. Домінуючими факторами виникнення та інтенсивності протікання водної ерозії є властивості ґрунтів (структурно-агрегатний стан, водопроникність, пористість) та морфологічні характеристики рельєфу (крутизна, кривизна, довжина, форма, експозиція схилів). Планування спостережень необхідно здійснювати з врахуванням масштабу досліджень конкретного фактора. Цей діапазон питань формує своєчасність та актуальність запропонованих в дисертації досліджень.

Використання фотограмметричних та картографічних методів у комбінації з сучасними методами обробки великої кількості вхідної інформації визначаються мірою необхідної детальності досліджень, а також економічною неможливістю організації постійних моніторингових спостережень за дослідним об'єктом. Для аналізу факторів, що спричиняють виникнення та інтенсивність площинної ерозії недостатньо використовувати лише геодезичні методи. Забезпечення необхідної ефективності польових робіт з метою економії часу та перенесення основних вимірювань в камеральні умови можливе шляхом використання фотограмметричного підходу. В свою чергу дослідження стереолого-планіметричних, порових та оцінки фільтраційних властивостей ґрунтів сприяють кращому розумінню процесу водної ерозії.

Еволюційний процес вдосконалення комп'ютерної техніки, супутніх геоінформаційних програм та методик у вивченні проблеми ерозії зумовив необхідність розгляду нових оперативних підходів з пошуку індивідуальних параметрів досліджуваної території для подальшого більш точнішого моделювання розвитку деградаційних процесів на якісно новому рівні.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Запропоновані дослідження відповідають тематиці наукових досліджень кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки: „Розробка теорії і практики цифрової фотограмметрії – мікрофотограмметрія, растрова електронна мікроскопія, тривимірна реконструкція мікрооб'єктів”, а також науково-дослідній роботі, що проводилась на цій кафедрі в період 2011–2013 рр. за темою: „Дослідження сучасного стану та розробка засобами ГІС-технологій і РЕМ-мікроскопії засад раціонального землекористування ерозійно-деградованих земель Волинської височини” (реєстраційний номер 0111 U 002146).

Тематика дисертаційної роботи відповідає Концепції боротьби з деградацією земель та опустелюванням, схваленої Кабінетом Міністрів України від 22. 10. 2014 р. № 1024, а також перспективі отримання грантів від Глобального екологічного фонду та Фонду адаптації, які створені як механізми фінансування проектів, що позитивно впливають на стан глобального навколишнього середовища, зокрема, у вивченні та запобіганні деградації земель та опустелювання.

**Мета і завдання досліджень.** Метою дисертаційної роботи є розробка нових підходів з визначення параметрів рівнянь змиву, вдосконалення методів дослідження властивостей ґрунтів, розробка теоретичних і практичних засад картографічного забезпечення оцінки стану ерозійних процесів в межах Волинського Опілля.

Основні завдання моніторингових досліджень, які були поставлені для досягнення мети дисертаційної роботи:

- встановити сучасні тенденції і проблеми використання земельних ресурсів Волинської височини;
- розробити оперативний фотограмметричний метод визначення параметрів R-функцій, якими можливе коректне моделювання домінуючих регіональних факторів ерозії ґрунту;
- адаптувати растрово-електронно-мікроскопічний метод дослідження мікроструктурних властивостей ґрунту в ерозієзнавчих цілях та встановити його взаємозв'язок з параметрами порового простору та протиерозійною стійкістю;
- удосконалити відомі моделі водної ерозії, які адаптивні до регіональних властивостей рельєфу та гранулометрії ґрунтів;
- розробити методику комплексної картографічної оцінки ерозійного стану земель Волинського Опілля;
- розробити алгоритм використання запропонованих методів під час розробки науково-обґрунтованих рекомендацій оптимального використання ерозійно уражених земель з метою створення екологічно збалансованого землекористування в межах Волинського лісостепу.

**Об'єктом дослідження** є деградовані землі Волинського Опілля внаслідок водної ерозії.

**Предметом дослідження** є картографічний, фотограмметричний та РЕМ-мікроскопічний підходи при дослідженні процесу водної ерозії з метою розробки альтернативних математичних моделей розрахунку площинного змиву адаптованих до регіональних умов Волинського Опілля.

**Методи досліджень.** Для розв'язання комплексу питань, які пов'язані з використанням комбінованих методів дослідження водної ерозії, з погляду на сучасні тенденції оперативно-економічного напрямку при вирішенні нагальних потреб сільськогосподарського виробництва застосовувалися різнопланові способи фіксування, обробки, аналізу, відтворення систематичних спостережень – геоморфологічні, картографічні, ґрунтознавчі, прикладної математики, цифрової фотограмметрії.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- розроблено методику визначення ентропії поверхонь сколів ґрунту за даними растрової електронної мікроскопії (РЕМ-мікроскопії) для характеристики протиерозійної стійкості;
- удосконалено методику дискретної оцінки площинної ерозії ґрунту в польових умовах із застосуванням методів короткобазисної фотограмметрії, а також використання отриманих даних для знаходження параметрів R-функцій;
- удосконалено методики отримання карт пластики рельєфу як можливого варіанту досліджень сільськогосподарських земель на наявність потенційно небезпечних зон (ерозійно-небезпечних ділянок) та карт анаморфоз – для простеження динаміки ерозійних процесів на значних територіях.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблені методики та запропоновані практичні рішення можуть бути використані:

- в роботі ерозієзнавців для встановлення залежностей між протиерозійною стійкістю ґрунту, розміром мікрочасток та поровим простором досліджуваних зразків ґрунту;
- в плануванні сівозмін шляхом визначення ерозійно небезпечних зон за допомогою карт пластики рельєфу як додаткової морфометричної характеристики території;
- для фермерських господарств під час проектування протиерозійних споруд та заходів, пов'язаних із раціональним використанням території;
- місцевими органами самоврядування під час прийняття рішень щодо впорядкування та захисту сільськогосподарських угідь від негативного впливу природно-антропогенних чинників.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи, отримані автором, опубліковані в 6 працях у співавторстві [1, 2, 3, 4, 5, 6] та 1 одноосібній [7]. Зокрема: в праці [1] автор проаналізував наукові літературні джерела з математичного моделювання водної ерозії та склав відповідні класифікаційні схеми; в роботі [2] – здійснено обробку РЕМ-стереозображень для визначення вихідних даних побудови цифрової моделі мікрорельєфу та виконано морфолого-спектральний аналіз поверхні зразків ґрунту; в науковій статті [3] – здійснено порівняння апроксимуючих функцій, проаналізовано статистичні дані порового простору отримані за допомогою програмного продукту „STIMAN”, опрацьовано результати дифрактометричних досліджень; в праці [4] – виконано калібрування опорних точок тест-об'єкта, отримано формулу апріорної точності запропонованого методу, виконано польові стереознімальні роботи, опрацьовано вхідну інформацію та отримані числові характеристики об'ємів змитого ґрунту; в роботі [5] – апробовано методику визначення ентропії для оцінки мікрорельєфу поверхні зразка ґрунту, виконано експериментальні дослідження профільних характеристик зразків та отримані конкретні числові значення; в науковій статті [6] – реалізовано комп'ютерний алгоритм прогнозу радіоекологічного стану уражених територій з використанням матриць Маркова, опрацьовано РЕМ-зображення кісткової тканини та отримані відповідні дані.

Дисертаційна робота виконана під керівництвом Мельника В.М. – заслуженого працівника народної освіти України, доктора технічних наук, професора кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру (ГЗіК) СНУ ім. Лесі Українки. При виконанні автором досліджень враховувались поради та консультації співробітників кафедри ГЗіК СНУ ім. Лесі Українки, зокрема, доцентів Радзія В.Ф., Короля П.П., Волошина В.У., Мельника О.В. за що автор висловлює свою щирю вдячність. Особливу вдячність автор висловлює професору кафедри фотограмметрії та геоінформатики НУ „Львівська політехніка” Бурштинській Х.В.

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні та експериментальні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на:

- V, VI, VIII Міжнародних науково-практичних конференціях студентів і аспірантів „Молода наука Волині: пріоритети та перспективи досліджень” (Луцьк, 2011 р., 2012 р., 2014 р.);
- Всеукраїнській науково-практичній конференції професорсько-викладацького складу „Проблеми землеустрою та геоінформатики” (Рівне, 2012 р.);
- Фестивалі науки Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки (Луцьк, 2013 р.);
- Всеукраїнській науково-практичній конференції „Геодезія. Землеустрій. Природокористування: Присвячується пам'яті П. Г. Черняги” (Рівне, 2014 р.)”;

- Міжнародній науковій конференції з природничих, математичних і технічних наук „NaMaTech-2014” (Будапешт, 2014 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 10 праць, в тому числі: 1 стаття в науковому періодичному виданні іншої держави, яке включено до міжнародних наукометричних баз даних, 1 стаття в науковому періодичному виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз даних, 5 статей у наукових фахових виданнях України, 3 – у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 195 сторінок, у тому числі 130 сторінок основного тексту, ілюстрації складають 50 рисунків (з них 5 на окремих аркушах) та 25 таблиць. Бібліографія включає 183 найменування поданих вкінці кожного розділу та сумарно складає загальний об'єм в 16 сторінок.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано стан та актуальність сформульованих задач, визначено мету досліджень та основні напрямки її досягнення, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів. Проаналізовано сучасний досвід вітчизняних та закордонних вчених у вирішенні пріоритетних завдань.

У першому розділі здійснено аналіз методологічних принципів ерозієзнавчих досліджень та регіональних аспектів сучасного стану еродованості земель Волинського Опілля. Детально розглянуті причини виникнення площинного змиву для конкретних регіональних умов. Проаналізовано 13 сучасних методів ерозієзнавчих досліджень та опрацьовано літературні джерела з 32 математичними моделями водної ерозії. За статистичними, фондовими та дослідними матеріалами встановлені критичні тенденції сучасного стану ґрунтового покриву в межах Волинського Опілля (табл 1). Наведеними в дисертації табличними даними підтверджені щорічні збільшення площ еродованих земель на 1,0 тис. га, що становить 2% від загальної площі еродованих сільськогосподарських угідь.

Зважаючи на негативні тенденції важливим є застосування високоефективних методів оцінки ерозійних і деградаційних процесів ґрунтового покриву. З всебічним врахуванням переваг та недоліків різних методів ерозієзнавчих досліджень, нами зроблено акцент на комплексне застосування картометричного та фотограмметричного підходів як альтернативних та взаємодоповнюючих. Стосовно механізмів водної ерозії ґрунту, на думку багатьох вчених ерозієзнавців, важливим є дослідження на мікрорівні з допомогою растрової електронної мікроскопії. Такі дослідження є нетривіальними та дозволяють оцінювати ерозійні процеси на більш глибокому рівні, що по суті не можливо із застосуванням традиційних підходів.

Таблиця 1

### Сучасні тенденції втрат ґрунту від площинної ерозії в межах півдня Волині

№ п/п	Назва адміністративного району	Динаміка втрат під дією водної ерозії (1 рік)			
		ґумусу		ґрунту	
		т/га	тис. т	т/га	тис. м <sup>3</sup>
1	Володимир-Волинський	0,6	5	21	196
2	Горохівський	0,7	15	23	548
3	Іваничівський	0,3	2	17	133
4	Ківерцівський	0,5	2	22	128
5	Локачинський	0,6	8	20	283
6	Луцький	0,6	12	21	470

З метою комплексної всебічної оцінки стану водноерозійних процесів в межах Волинського Опілля були здійснені картометричні дослідження з використанням топографічних карт масштабів 1:10 000 (7 шт.), 1:25 000 (15 шт.), 1:100 000 (6 шт.) шести південних районів Волинської височини. В сукупності було опрацьовано в програмних середовищах Surfer та Arc Gis 28 топографічних карт із загальною кількістю набраних точок 493 321. Основні результати виконаних картометричних та фотограмметричних досліджень детально представлені в дисертаційній роботі.

У другому розділі „**Фотограмметричні підходи при дослідженні водної ерозії та теоретико-емпірична оцінка площинного змиву ґрунту**” запропонована концепція фотограмметричного визначення параметрів субмоделей прогнозної мультиплікативної моделі водної ерозії на основі R-функцій. При цьому здійснений критичний аналіз значної кількості відомих в ерозієзнавстві моделей ерозії.

В умовах великомасштабного латифундійського землекористування (300-500 тис. га), як показали детальні дослідження доц. Процика М.Т. (2012 р.), доцільно застосовувати космоснімки різної роздільної здатності (від 1,8 до 15 м/пікс). У випадку зняття мораторію на продаж земель сільськогосподарського призначення буде спостерігатись тенденція формування малих (до 500 га), середніх (від 500 до 1000 га) та великих (понад 1000 га) фермерських господарств. При такому підході застосування космоснімків, хоч і можливе, проте економічно недоцільне, особливо у випадку необхідності контролю за раціональним використанням сільськогосподарських територій, що проявляється не тільки у візуальному погіршенні стану ґрунтового покриву, але і його ґрунтознавчих характеристик (гранулометричний, мікроагрегатний склад, поровий простір тощо). У випадку наявності наземного лазерного сканера (точність знімання від 50 до 2 мм) можна детально досліджувати топографічну поверхню схилу з сучасних наукових позицій та потреб суспільства. Проте висока вартість (від 1,3 до 2,3 млн. грн) такого обладнання не дозволяє його повно масштабне використання, в тому числі, для ерозієзнавчих досліджень. З таких позицій необхідно розробляти нові або вдосконалювати існуючі методи оперативного-ефективного отримання інформації про родючий шар.

Розглянемо більш детально методи фотограмметричного забезпечення дослідження площинної ерозії. Нами пропонується використовувати короткобазисну стереозйомку (короткобазисна фотограмметрія – КБФ) в натурі (на місцевості), оскільки в сучасних умовах здійснювати побудову стокових майданчиків є затратним. Тому пропонується як альтернатива таким майданчикам застосовувати короткобазисну стереозйомку на елементарних ділянках розміром 1×1 м.

Для реалізації короткобазисного стереознімання нами виготовлено оригінальну фотоустановку (завод СТО, м.Нововолинськ) і тестовий об'єкт у формі прямокутної рами (приладобудівний завод ПАТ „Електротермометрія”, м. Луцьк). Дане обладнання дозволяє здійснювати стереознімання в масштабі 1:60 з можливістю розв'язання за опорними точками тест-об'єкта зворотної фотограмметричної засічки з подальшим визначенням просторових координат за добре відомими формулами прямої фотограмметричної засічки.

Тест-об'єкт містить різновисотні просторові призми, закріплені через рівні проміжки по периметру, а також перехрестя металевих взаємно перпендикулярно закріплених струн. Всього 57 опорних точок. Їх координати визначались лінійними промірами за допомогою женецької лінійки (точність 0,2 мм). Врівноваження здійснено корелатним методом квазігеодезичного чотирикутника.

При проведенні польових стереознімальних робіт використано фотокамеру NIKON D90 (фокусна відстань  $f = 20$  мм, розрізнення матриці 12,9 мегапікселів, розмір сенсора  $23,6 \times 15,8$  мм, формат знімка  $4288 \times 2848$  пікселів). Параметри стереознімання висота  $H = 1,2$  м,  $B = 0,41$  м, масштаб  $1:60$ , базисне співвідношення –  $1/3$ .

Алгоритм фотограмметричної обробки неметричних знімків короткобазисної фотограмметрії базується на проєктивних перетвореннях і здійснюється в 2 етапи.

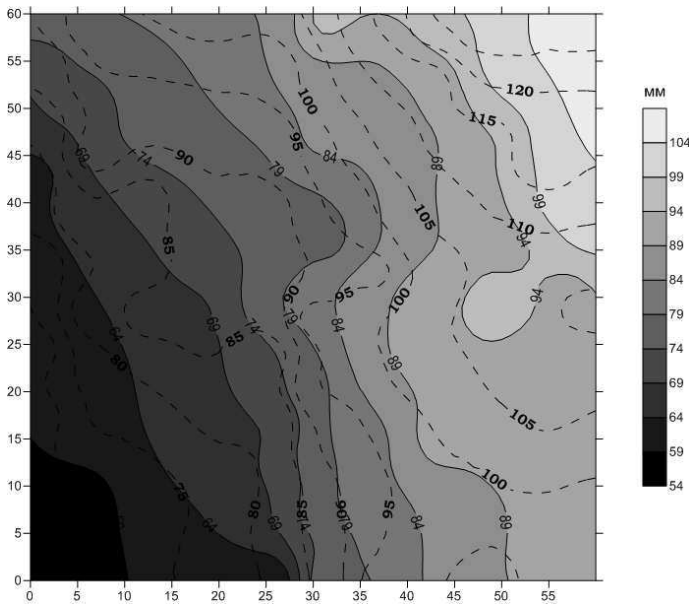
Перший етап. За координатами тест-об'єкта обчислюються 11 параметрів проєктивного перетворення:

$$A_{ij} \cdot X_i = L_{ij} + V_{ij},$$

$$X = \begin{bmatrix} A^T \cdot A \end{bmatrix}^{-1} \cdot A^T \cdot L_{ij} \quad (1)$$

$X_i = [a_1, a_2, \dots, a_{11}]$   
(1x1)

Другий етап. За обчисленими параметрами проєктивного перетворення ( $a_1, \dots, a_{11}$ ) і вимірними фотокоординатами ( $x_i, y_i$ ) розв'язується пряма фотограмметрична засічка, тобто визначаються просторові координати точок ЦМР елементарного стокового майданчика ( $X_i, Y_i, Z_i$ ). Стереовимірювання виконано на ЦФС „Дельта”, а опрацювання за допомогою програмного продукту „Digitals”. Результатом виконаних досліджень стала картограма змиву (рис. 1).



— — ізолінії до початку дощування  
 - - - — ізолінії після проведення дощування  
 Рис. 1. Картограма змиву, побудована за здійсненим набором точок

Оперативність даного методу фіксування змін висоти досліджуваної поверхні очевидна: кількість контрольних точок на стереопарі можна збільшити в камеральних умовах; внесення вхідної інформації до комп'ютера для побудови супроводжуючих карт-матеріалів здійснюється в автоматичному режимі; можливість корегування отриманих даних без повторного виїзду на місцевість; використання отриманих знімків для візуального сприйняття процесу змиву на будь-якому етапі пост активних досліджень.

Для розрахунку об'ємів змитого ґрунту використано метод профільних січень, побудованих через рівні проміжки, що становлять 10 см на місцевості. Їх використано як базові при визначенні інтенсивності змиву ґрунту за неметричними знітками

короткобазисного стереознімання. Для порівняння додатково вираховано об'єм змитого ґрунту за TIN-моделлю способом трикутних призм.

Для цього випадку об'єм змитого ґрунту дорівнює різниці об'ємів ґрунту відносно умовної поверхні на початку та в кінці відповідного етапу дощування.

Очевидно, в межах кожної трикутної призми об'єм обчислюється з виразу:



$$V_i = S_i h_{icp} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \overline{h}_i & \overline{h}_i & \overline{h}_i \\ X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

де  $S_i$  – площа основи, що визначається за координатами вершин основи трикутної призми,  $h_{icp}$  – середнє значення висоти,  $X_1 - X_3$  та  $Y_1 - Y_3$  – планові координати. Для  $i$ -тої трикутної призми  $h_{icp} = (h_1 + h_2 + h_3)/3$ .

Повний об'єм дорівнює сумі елементарних об'ємів:

$$V_{повн.} = \sum_1^N V_i. \quad (3)$$

Для способу вертикальних профільних січень з очевидних побудов об'єм змитого ґрунту складатиме:

$$V_{повн.} = V_1 + V_2 + \dots + V_k = \frac{S_1 + S_2}{2} L_1 + \frac{S_2 + S_3}{2} L_2 + \dots + \frac{S_k + S_{k+1}}{2} L_k, \quad (4)$$

де  $S_1, S_2, \dots, S_{k+1}$  – площі вертикальних січень між поверхнями ґрунту на кінцевий і початковий момент досліджень;  $L_1, L_2, \dots, L_{k+1}$  – відстані на місцевості між сусідніми січеннями, які в нашому випадку дорівнюють 10 см. Тоді:

$$V_{повн.} = \sum_1^k V_{ел.} = L/2(S_1 + 2S_2 + \dots + 2S_k + S_{k+1}). \quad (5)$$

Звідси:

$$V_{повн.} = L \sum_1^k S + L/2(S_1 + S_{k+1}). \quad (6)$$

За результатами фотограмметричної обробки знімків середні квадратичні похибки визначення координат точок об'єкта, отримані з порівняння вимірних і заданих координат із 24 контрольних точок, характеризуються такими величинами:  $m_x = \pm 2$  мм;  $m_y = \pm 3$  мм;  $m_z = \pm 4$  мм. На шести опорних точках похибки не перевищували такі значення:  $m_x = \pm 2$  мм;  $m_y = \pm 1$  мм;  $m_z = \pm 1$  мм. Оптимальні результати можна отримати, якщо комірки тест-сітки становлять 5-10 мм; відповідна точність вимірювання позначок лежить в межах 0,5...1,5 мм.

Отримана точність фотограмметричного методу визначення об'єму змитого ґрунту визначається дискретизацією вимірювання висот поверхні і густиною профільних січень. Точність визначення висот  $m_h$  залежить власне від точності стереовимірювань і ступеня розрихлення. Зрозуміло, що цей процес в різні пори року протікає по-різному, оскільки він 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 площадки  $m_H$  за умови, що похибки розрихлення ґрунту  $m_{hp}$  за стереовимірюванням є незалежними оцінками точності і складатиме:

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

За результатами досліджень встановлено: якщо точність стереовимірювань повинна бути близько 1,5–1,7 мм, тоді точність визначення об'єму площинного змиву складатиме 2 %. Висока точність підтверджує положення, що метод короткобазисної фотограмметрії з близьких відстаней може бути еталонним значенням для порівняння з багатьма іншими відомими методами. Такий підхід є мобільним і дозволяє оцінювати ерозію схилів різної морфометричної будови.

Реалізація методу КБФ дозволяє оцінювати не тільки змив ґрунту в межах елементарних стокових майданчиків (ЕСМ), а й отримувати репрезентативну вибірку для масивів різної площі.

Питанням математичного моделювання площинної ерозії приділяється значна увага вчених і практиків. Проте не має єдиної думки про методи достовірного вивчення цих процесів. З аналізу літературних джерел (розділ 1) можна стверджувати, що оптимальною, в плані отримання достовірних прогнозних даних та, відповідно, найбільш вживаною в сучасних дослідженнях з математичної інтерпретації площинного змиву є модель USLE Вішмеєра-Сміта. Вона була отримана вченими США в результаті безперервних 30-річних систематичних досліджень. Для наших умов вказана модель мало придатна у зв'язку невеликою пересіченістю місцевості. Тому нами була надана перевага моделі RUSLE, яка крім геоморфологічного чинника ( $LS$ ), включає ряд інших важливих компонентів (ерозійний індекс дощу ( $EI$ ), еродованість ґрунтів ( $KS$ ), ґрунтозахисні властивості польових культур ( $CUL$ ), показник ефективності протиерозійних заходів ( $AGR$ )).

Модель RUSLE за своєю суттю споріднена із широко використовуваними моделями R-функцій. У випадку комплексної водно-вітрової ерозії в практиці використовується близько 10 моделей. Переваги їх в порівнянні з іншими – подібність. R-функції для факторів змиву виражаються 5 одно типовими логістичними кривими, які в загальному вигляді ( $f_1^e - f_4^e$ ) можна записати так:

$$f_j^e(x_j) = \alpha_j \left( \frac{1.0}{a_j + \exp(b_j - c_j x_j)} - d_j \right), \quad j=1, \dots, 4, \quad (8)$$

а модель  $f_5^e$  як:

$$f_5^e(AGR) = 1.0 - \alpha_5 (1.0 - \exp(-b_5 AGR))^{c_5}, \quad (9)$$

де  $\alpha_j, a_j, b_j, c_j, d_j$  – параметри субмоделі;  $j=1, \dots, 5$ .

Для їх реалізації необхідно знати п'ять параметрів  $\alpha_j, a_j, b_j, c_j, d_j$ , які визначаються за результатами багаторічних статистичних і фондових матеріалів, що не завжди можливо. Тому нами використано отримані дані практичної апробації методу короткобазисної фотограмметрії, який дозволив для досліджуваних фізико-географічних, геоморфологічних, ґрунтових та інших умов визначати конкретні параметри рівнянь R-функції. Для цього отримані значення об'ємів змиву підставляються у кожне рівняння та ітеративним шляхом (метод чисельного оцінювання Марквардта) визначаються коефіцієнти. Верифікація методу КБФ з широко вживаним в ерозієзнавстві графо-аналітичним методом професора Ларіонова Г.А. підтвердила достовірність визначення об'ємів загального змиву в межах 5-8%.

Як результат розраховано значення параметрів трьох субмоделей площинної ерозії ґрунтів, які адаптовані до досліджуваних умов Волинської височини, зокрема ерозійного індексу дощу, рельєфу та еродованості ґрунтів.

З використанням наведених субмоделей ерозії була складена (інж.-програміст Фесюк О., доц. Волошин В., асп. Мендель В.) програма „EROSION” (рис. 2).

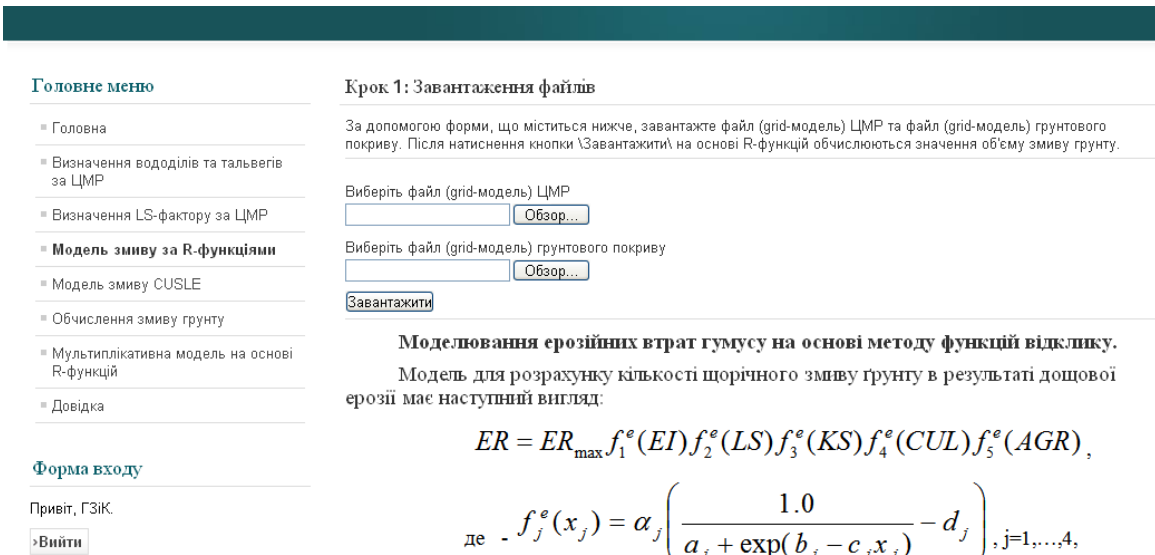


Рис. 2. Загальний вигляд головної сторінки програми „EROSION”.

Картографічні інтерпретації ерозійного потенціалу рельєфу подані в дисертаційному дослідженні. Підсумовуючи результати використання запропонованих субмоделей можна сказати, що рівняння R-функцій дозволяють: з високою ймовірністю прогнозувати (85%), здійснювати коректне апроксимування експериментальних даних, можливість змістовного трактування параметрів моделі в кожному окремому випадку, а простота – дає можливість застосовувати для моделювання стандартне програмне забезпечення.

У третьому розділі „Лабораторні дослідження основних морфолого-морфометричних показників типових ґрунтів Волинського Опілля та ґрунтознавчо-гранулометрична модель водної ерозії” розглянуті можливості використання стереолого-планіметричних характеристик ґрунтів досліджених растрово-електронно-мікроскопічним методом для простеження на новому рівні взаємозв’язку протиерозійних властивостей з морфологічними показниками ерозійно-небезпечних ґрунтів. Створено адаптований варіант ґрунтознавчо-гранулометричної моделі водної ерозії для регіональних умов.

**Стереологічні дослідження властивостей ґрунтів РЕМ-методом.** В сучасному ерозієзнавстві багато уваги надають дослідженням зразків ґрунту за допомогою растрової електронної мікроскопії (РЕМ). Такі дослідження у вітчизняній практиці через високу вартість РЕМ-мікроскопів проводяться дуже рідко. Нами спільно з вченими Московського державного університету ім. Михайла Ломоносова в лабораторії растрової електронної мікроскопії геологічного факультету (2010р.) були проведені дослідження двох типів ґрунтів (чорнозему типового та дерново-підзолистого ґрунту), відібраних на типових ділянках комплексного регіонального геостаціонару (с.Забороль). Дослідження виконувались на сучасному високоприцевійному растровому електронному мікроскопі Hitachi-S800. Відбір і препарування зразків здійснювалось за стандартною технологією. РЕМ-знімання виконувались при збільшеннях в 50, 100, 250, 1000 крат. Стереознімання виконувалось методом нахилів досліджуваних зразків відносно горизонтальної площини, навколо осі  $X(Y)$ :

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & 0 & -\sin \alpha_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_1 & 0 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 & 0 & \sin \alpha_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_2 & 0 & \cos \alpha_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (10)$$

Якщо  $\alpha_1 = \alpha_2$ , то  $X = \frac{x_1 + x_2}{2 \cos \alpha}$ ,  $Y = y_1 = y_2$ ,  $Z = \frac{x_2 - x_1}{2 \sin \alpha}$ .

На рис. 3 подано 3D-модель, яка побудована за результатами фотограмметричного опрацювання РЕМ-стереопари.

Крім кількісної оцінки мікрофотографій здійснювалась стереолого-планіметрична обробка РЕМ-зображень. В дисертації реалізовано порівняно новий стереолого-стереометричний метод (Мельник В.М. та ін., 1999), який дозволяє здійснювати просторовий аналіз цифрової моделі мікрорельєфу (ЦММР) за орієнтаційними характеристиками.

Для переходу від кількісних морфологічних і геометричних показників, що отримуються при такому аналізі, до об'ємних, пропонується здійснювати 3D-реконструкцію мікроструктури ґрунту за допомогою стереовимірювань РЕМ-зображень. Розроблено оригінальний метод стереометричної оцінки просторової організації мікроструктури ґрунту блок-схема якого представлена на рис.4.

Такий аналіз базується на використанні прямого і зворотного перетворень Фур'є, зокрема, розрахунку АКФ. Метод передбачає обчислення автокореляційної функції, згладжування, обчислення нормованих спектральних щільностей. Оскільки побудована ЦММР „зашумлена”, необхідне згладжування або фільтрація, для чого нами пропонується використовувати фільтр Баттеруорта:

$$y(i) = b_0 x(i) - a_1 y(i-1) - a_2 y(i-2), \quad (11)$$

де  $x(i)$  – елемент із вхідної вибірки,  $y(i)$  – елемент вихідної вибірки,  $i = 1, n$ ,  $n$  – кількість елементів вибірки,  $y(0) = y(1) = 0$ .

Після процедури згладжування отримується профіль, який відповідає стаціонарному випадковому процесу. Аналіз гістограм розподілу його амплітуд показує, що цей процес є Гауссівським або наближеним до нього (гістограми приведені в дисертації). Для реалізації Фур'є перетворень застосовують алгоритм Блекмона-Тюкі, за допомогою якого

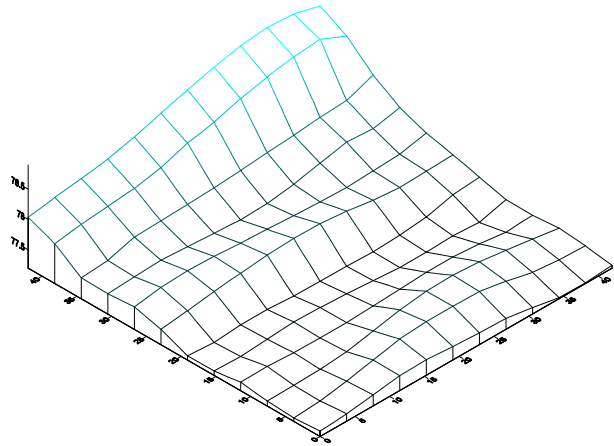


Рис. 3. ЦММР за результатами РЕМ-стереообробки

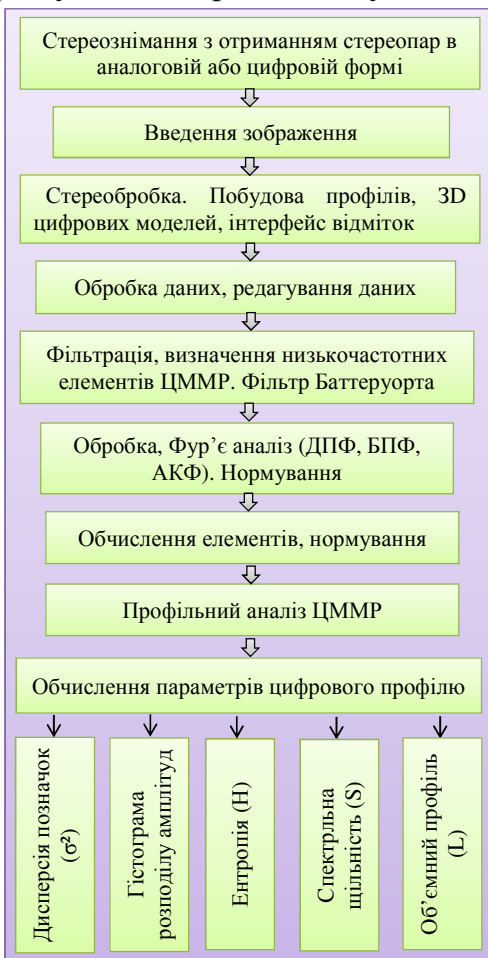


Рис. 4. Блок-схема морфолого-спектрального аналізу поверхні зразка ґрунту.

розраховується спектральна щільність. Для цього виконуємо Фур'є-спектральний аналіз, коваріаційні функції якого обчислюються за відомими формулами. Отримані спектри відображають розподіл середньоквадратичної потужності процесу як функції частоти і відповідно характеризують внесок елементів мікрорельєфу в його потужність. Таким чином, в даному випадку, частота однозначно зв'язується з елементами профілю. Інтегруючи спектр за частотами, можна оцінити загальну дисперсію відміток мікрорельєфу  $\sigma_i^2$ , поміряних на профілі, а також долю дисперсії, що припадає на окремі інтервали частот (розміри елементів). Така можливість впливає з відомого рівняння Парсеваля:

$$\psi^2(f_1, f_2) = \int_{f_1}^{f_2} S_x(f) df, \quad 0 \leq f_1 \leq f_2, \quad (12)$$

де  $\psi^2$  – потужність процесу;  $S_x$  – щільність спектру потужності;  $f_1, f_2$  – нижня і верхня межа частот.

На рис. 5 подано приклад РЕМ-знімка на якому виконувалась практична реалізація запропонованого методу. Отримане значення  $H \leq 1,5$  означає високу протиерозійну стійкість, а  $H \geq 1,5$  – протиерозійну стійкість, що зменшується та прямує до нуля ( $H \rightarrow 5,0$ ). У результаті аналізу РЕМ-зображень зразка ґрунту та проведених послідовних обчислень одержали такі значення:  $R(i) = 36,74$ ;  $S^2 = 14,58$ ;  $L = 2,19$ ;  $H = 3,28$ . Виконано програмну реалізацію даного методу за допомогою складеної програми морфологоспектрального аналізу алгоритм якої наведений в додатках дисертації.

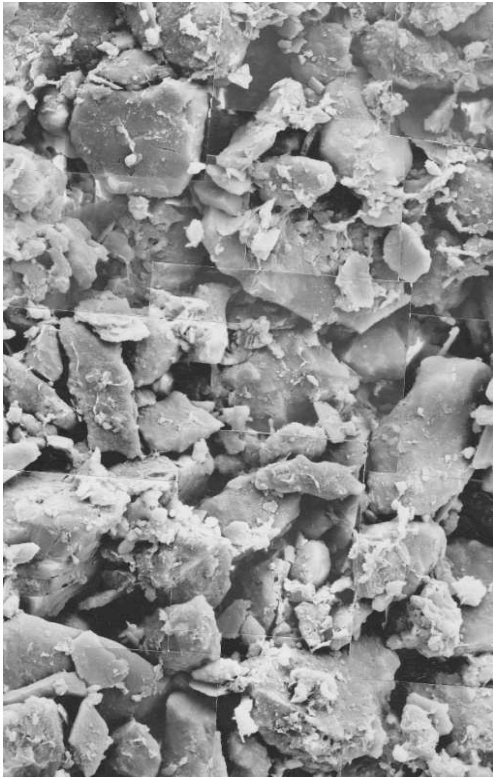


Рис. 5. РЕМ-зображення зразка ґрунту (метод *resampling*), отримане з допомогою РЕМ «Hitachi-S800» (збільшення 1000x).

Іншою можливістю растрової електронної мікроскопії є дослідження ентропійних властивостей ґрунту. Зразки ґрунту можна розглядати як дисипативні структури, в основі яких лежать процеси утворення ентропії і перерозподілу енергії, що вноситься ззовні. Для кількісної оцінки ентропії нами розроблена методика стереометричного аналізу РЕМ-стереопар. Розрахунок ентропійної характеристики мікроструктури ЦММР запропоновано здійснювати на основі аналізу профільного розподілу позначок мікрорельєфу. При цьому ентропія характеризуватиме ступінь неоднорідності (невпорядкованості) рельєфу поверхні сколів ґрунту і може оцінюватися за відомою формулою Шеннона:

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \ln p_i, \quad (13)$$

де  $p_i$  – імовірність перебування системи в  $i$ -му стані;  $N$  – число станів системи. Відносна ентропія обчислюється як:

$$O = 1 - H/H_{\max}. \quad (14)$$

Як результат стереобробки РЕМ-зображень є отримання карти ізоліній та його профільної характеристики (рис. 6, а,б,в).



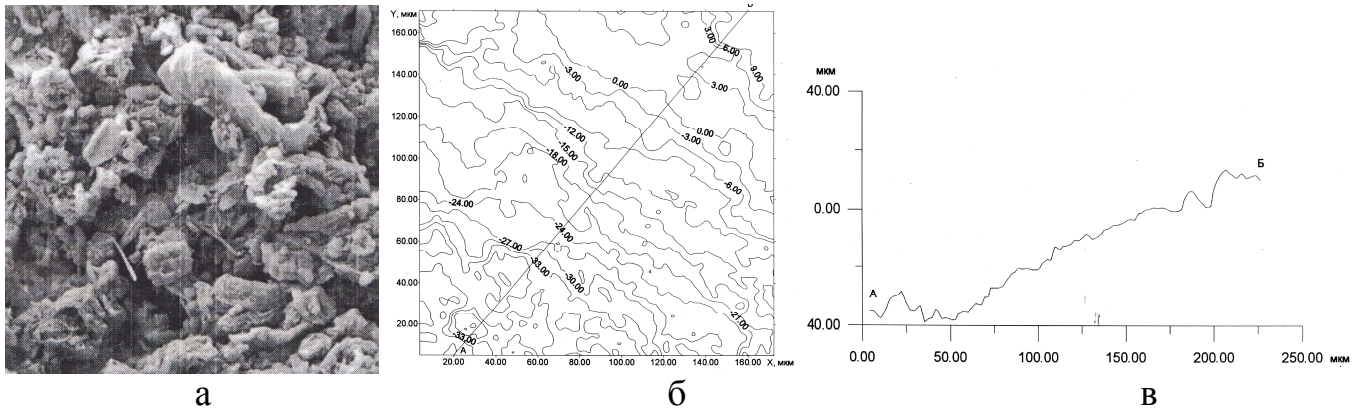


Рис.6. Приклад стереометричного аналізу РЕМ-знімків ґрунту:

а – РЕМ-знімок ґрунту; б – карта ізоліній; в – профільна характеристика.

За даними РЕМ-стереовимірювань отримується цифрова модель мікрорельєфу (ЦММР). За відмітками ЦММР розраховується ентропійна характеристика:

$$H(u_j/u_{j-1}) = H(z_j), \quad (j = 1, 2, \dots, n). \quad (15)$$

Згідно з (12)  $H(z_j) = M\{-\log[f(z)\Delta z]\}$ ,  $H$  – умовна ентропія; де  $M$  – символ математичного сподівання;  $f(z)$  – щільність розподілу ймовірностей випадкових величин;  $\Delta z$  – крок квантування профілю за висотою.

В дисертації наведені приклади практичної реалізації такого підходу. Експериментальними дослідженнями встановлено, що близької до граничної величина ентропії властива зразкам з низькою і сильно змінюваною міцністю структурних зв'язків. Значення оцінки ентропії характерної точки – інтервал квантування з кроком  $\Delta z = 0,1$  мкм, який і визначає інформаційну ємність ЦММР, а отже, найбільш піддатливу тверду фазу скелета ґрунту (частота Найквіста). Всі дослідженні зразки за результатами морфолого-спектрального аналізу мали показник ентропії  $H$  від 2,10 до 3,12. В нашому випадку це частки з діаметрами 81 мкм, що властиво ґрунтам з низькою і сильно змінюваною міцністю зв'язків, яке зумовлює рівноймовірне порушення структурних елементів практично будь-якого рівня організації (чорноземи та дерново-підзолисті ґрунти), а отже, прояву змивних процесів під дією зовнішніх факторів.

Запропонований метод базується на новітніх засадах та принципах стереології і цифрової фотограмметрії. Він дозволяє на основі стереометричного аналізу профільної характеристики РЕМ-зображення зразка ґрунту в автоматичному режимі визначати ступінь неоднорідності (непорядкованості) ЦММР. Врахування в ерозієзнавстві досліджень ентропійних властивостей ґрунтів дозволяє більш повно оцінювати протиерозійну стійкість.

В практичній роботі з оцінки та прогнозування водно-вітрової ерозії державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру, а також науково-дослідних інститутах використовують ґрунтознавчі, гранулометричні моделі із встановленням їх параметрів, які змінюються до конкретних регіональних умов. Нами на замовлення Волинської обласної державної адміністрації в рамках програми держбюджетної теми „Дослідження сучасного стану та розробка засобами ГІС-технологій і РЕМ-мікроскопії засад раціонального землекористування ерозійно-деградованих земель Волинської височини” (реєстраційний номер 0111 У 002146) були проведені відповідні дослідження стереолого-планіметричних характеристик.

Як було уже сказано, РЕМ-дослідження дозволяють отримати морфологічні та морфометричні показники досліджуваних зразків ґрунту, зокрема, визначення

пористості та фільтраційних властивостей. При цьому досить важливим є диференціація пор і скелетного (твердого) компонента.

Виділення скелетного (твердого) компонента структури мікрооб'єктів в РЕМ є однією з найбільш складних та актуальних задач стереолого-морфологічного аналізу. Основна проблема пов'язана з неоднозначністю, а в більшості випадків і неможливістю вибору оптимального рівня дискримінації, як це прийнято у звичайно використовуваному пороговому методі, при якому тверді структурні елементи виділяються на напівтоновому РЕМ-зображенні за умов мінімальних спотворень їх розмірів і форми. Найбільшу складність при цьому представляють групи близько розміщених один до одного структурних елементів, виділення яких нестійке по відношенню до параметрів бінаризації.

Як наслідок при автоматичному стереолого-морфологічному аналізі такі групи структурних елементів можуть сприйматися як один структурний елемент. Це призводить до спотворення результатів аналізу – завищенню числа крупних мікрооб'єктів і заниженню числа більш дрібних. Тому особливої актуальності набуває задача коректного розподілу конгломератів структурних елементів на

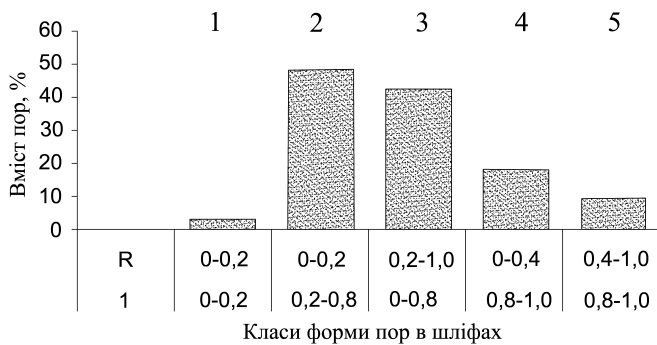


Рис. 7. Гістограма розподілу макропор за формою:

- (1 – трищинуватоподібні; 2 – витягнуті зрізані; 3 – витягнуті слабо зрізані; 4 – ізометричні зрізані; 5 – ізометричні слабо зрізані)

складові. Очевидні підходи, пов'язані із застосуванням суперпозиції базових методів математичної морфології, таких як дилатація, ерозія та інші, не вирішують даної проблеми. Для розв'язання цієї задачі було запропоновано застосовувати діаграму Вороного, програмна реалізація якої здійснена вченими МДУ ім. Михайла Ломоносова у вигляді ПП „STIMAN”.

Аналізуючи діаграми та табличні дані морфометричних характеристик обраних нами двох найпоширеніших ґрунтів в межах Волинського Лісостепу: чорноземів типових та дерново-підзолистих ґрунтів встановлено наступне. Більші пори мають і більш округлу форму, що підтверджується збільшенням показника ізометричності від 0,13 до 129,75 при збільшенні еквівалентного діаметра пор. Поровий простір характеризується значною мінливістю, про що свідчить графік розподілу еквівалентного діаметра пор (від 4 до 27 мкм). Менший внесок вносять тонкі мікропори, що формують порожнечі між ультрамікроагрегатами. Це вказує на те, що в залежності від характеристики пор змінюється водопоглинаюча властивість ґрунту, а відповідно і інтенсивність змиву.

Порівнюючи отримані дані з архівними даними спостережень за змивом проведених на організованих стаціонарах в межах Горохівського району Поліською філією Інституту ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського встановлено: фільтраційні властивості чорноземів є гіршими, а отже, і змив більший ніж аналогічні показники дерново-підзолистих ґрунтів, 9,8 т/га/рік та 7,2 т/га/рік відповідно.

Отримані рівняння регресій та кореляційних залежностей загальної пористості досліджуваних ґрунтів від їх загальної площі (для чорнозему –

застосуванням суперпозиції базових методів математичної морфології, таких як дилатація, ерозія та інші, не вирішують даної проблеми. Для розв'язання цієї задачі було запропоновано застосовувати діаграму Вороного, програмна реалізація якої здійснена вченими МДУ ім. Михайла Ломоносова у вигляді ПП „STIMAN”.

За статистичними даними кількісного стереологічного аналізу досліджуваних зразків отримали діаграму приклад якої наведений на рис. 7.

Аналізуючи діаграми та табличні дані морфометричних характеристик

$n_A = f(A)$ ,  $n_{ч} = 4,95 \times 10^{-3} A - 10,9$ ,  $R = 0,91$ ; для дерново-підзолистого ґрунту –  $n_A = f(A)$ ,  $n_{дп} = 5,02 \times 10^{-3} A - 11,21$ ,  $R = 0,87$ ). Дані дослідження дозволили отримати параметри властивостей ґрунту без використання загально вживаних підходів в ґрунтознавстві, які використані при розробці ґрунтознавчо-гранулометричної моделі ерозії ґрунту для умов досліджуваної території.

Поровий простір передбачає визначення таких статистичних параметрів пор: розподіл за еквівалентними діаметрами, за площею та периметром, фактором форми, ступенем порізаності, коефіцієнтом фільтрації.

В дисертації приведені приклади успішного застосування стереологічного аналізу РЕМ-зображень зразків чорноземного типу ґрунту, зокрема, розподіл пор за еквівалентним діаметром, площею та периметром. Знання таких параметрів дозволяє більш достовірно оцінювати протиерозійну стійкість ґрунтів і враховувати її у вигляді додаткових коефіцієнтів у математичних моделях змиву.

Загальний вигляд запропонованої ґрунтознавчо-гранулометричної моделі для умов Волинського Опілля наступний:

$$K = 2.1 \cdot 10^{-4} (12 - a) \cdot n \cdot M^{1.14} + (3.25(St - 2)) + (2.5(Pt - 3)), \quad (16)$$

де  $K$  – чинник еродованості ґрунту;  $a$  – вміст органічної речовини у ґрунті;  $St$  – код ґрунту за структурою;  $Pt$  – код ґрунту за водопроникністю,  $n$  – коефіцієнт пористості;  $M = Silt(Silt + Sand)$  – параметр розміру частинок ґрунту;  $Silt$  – вміст мулу (%);  $Sand$  – вміст піску (%).

Для умов півдня Волині за результатами аналізу багаторічних даних та математико-статистичної обробки РЕМ-зображень зразків ґрунту отримані такі конкретні значення типових ґрунтів (табл. 2).

Таблиця 2

### Розрахунок значень чинника еродованості ґрунту

Шифр ґрунту	a, %	Sand, %	Silt, %	St	Pt	M	K	n
13	1,2	13,6	17,1	3	2	524,970	3,612	3,5
16	1,5	12,4	18,7	3	2	581,570	3,876	4,0
18	1,7	5,8	19,8	3	2	506,880	3,372	4,4
19	1,7	5,9	19,5	3	2	495,300	3,304	4,8
20	1,4	2,8	19,9	3	2	451,730	3,116	5,1
24	1,7	4,2	33,7	3	2	1277,230	8,270	5,2
26	1,2	4,7	32,8	3	2	1230,000	8,303	6,4
31	2,1	3,9	34,5	3	2	1324,800	8,285	6,0
38	1,9	9,4	22,1	3	4	696,150	9,442	6,7

В результаті розраховані за відповідною моделлю об'єми змитого ґрунту (11 т/га/рік) свідчать про їх високу точність (точність верифікації моделі порядку 85%), що дозволяє лише з використанням ґрунтознавчих та РЕМ підходів моделювати та прогнозувати можливу динаміку ерозійних процесів для конкретних агроландшафтів.

Отже, ґрунтознавчо-гранулометричну модель з даними табл. 2 можна вважати моделлю для умов Волинського Опілля, за допомогою якої можна здійснювати порівняльне прогнозування стану ерозійних процесів. Як показали наші дослідження практичне застосування в ерозієзнавстві РЕМ-мікроскопії є важливим чинником розуміння конкретних механізмів виникнення, динаміки та тенденції



розвитку ерозійних процесів, яке уможливорює корекцію агротехнічних та інших протиерозійних заходів.

У четвертому розділі „Картографічне забезпечення моніторингу регіональних ерозієзнавчих досліджень” запропоновано методика створення серії тематичних карт дослідження ерозійних процесів на регіональному рівні, які інтегровані в сучасні програмні продукти геоінформаційних систем.

Сучасний аналіз топографічної поверхні ґрунтується в переважній більшості на отриманні класичних карт: крутизни, експозиції, довжин та форм схилів. Такі карти, як правило, виконуються добре відпрацьованими методами. Водночас аналіз горизонталей на гіпсометричних картах проводиться без врахування отриманих значень кривин. При цьому потрібно розуміти, що ізолінія або горизонталь є фундаментальною лінією, на основі якої можливе вивчення морфометричних характеристик рельєфу. Важливим моментом такого аналізу є можливість використання властивостей самої горизонталі та сукупної картини, яку вона створює. Насамперед, мова йде про точки перегину горизонталей (точки нульової, від’ємної та додатньої кривин), що є нічим іншим як межею опуклих і увігнутих форм рельєфу. При сполученні точок одної з трьох кривин можна отримати морфоізографу. Проведення морфоізограф дає змогу відокремити різні форми рельєфу, що у свою чергу дозволяє виділяти водозбірні басейни, лінії тальвегів і вододілів. Результатом такого дослідження є побудована на основі морфоізограф карта пластики рельєфу з базовими контурами, що може бути використана як основа при проведенні польових досліджень водної ерозії, а також як система додаткового аналізу ерозійного потенціалу рельєфу.

Виконання нами побудови морфоізографів на території комплексного регіонального геостационару Заборольської сільської ради Луцького району Волинської області здійснювалось за допомогою вбудованого у програмний продукт Surfer модуля моделювання поверхонь Terrain Modeling. Верифікацію отриманих моделей проведено графічним способом.

Відповідно визначення особливо ерозійно-небезпечних територій виконували за методикою оверлею карт лінійної пластики рельєфу в двох головних ортогональних напрямках. Здійснюючи суміщення карт лінійної пластики рельєфу, отримується відповідна інтерпретація зон підвищеної ерозійної активності, викликаної чинником рельєфу (рис. 8).

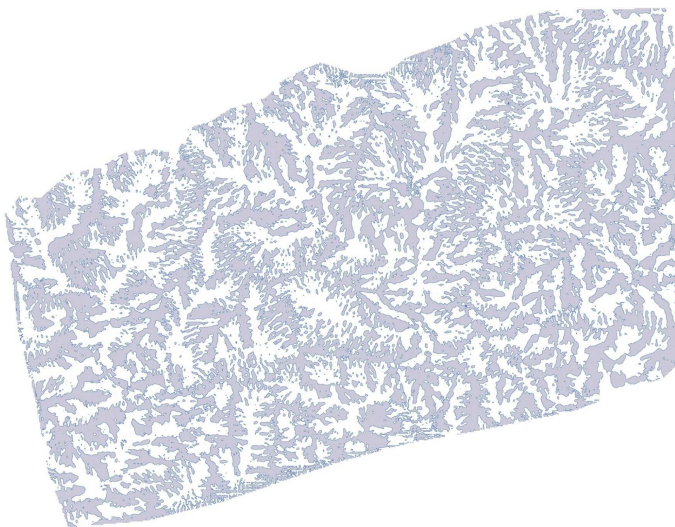


Рис. 8. Карта пластики рельєфу комплексного регіонального геостационару

Експериментальні дослідження підтвердили наступне: ареали поширення різних форм рельєфу, обмежені морфоізографами, корелюють із зонами поширення певних ґрунтових типів (рис. 9); ці ж ареали співпадають з зонами поширення ярково-балкових систем (ця характеристика підтверджує доцільність і необхідність використання морфоізограф як основного індикатора локалізації палеорельєфу при проведенні досліджень площинного змиву ґрунтів).

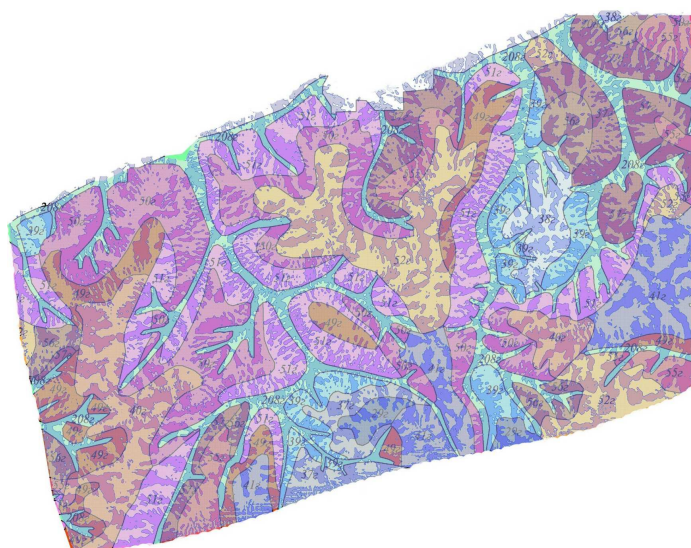


Рис. 9. Оверлей ґрунтової карти і карти пластики рельєфу типової ділянки комплексного регіонального геостаціонару

база атрибутивних даних: оцифровані нами топографічні карти масштабу 1:100000, 1:25000, 1:10000).

В сучасному ерозієзнавстві значна увага приділяється використанню космо-, аерофотозйомки для дослідження інтенсивності змиву на основі аналізу різночасових спектрозональних або панхроматичних знімків за оригінальними методиками Замятіна А.В., Zhang Y. (2004) та Процика М.Т. (2012). Результатом опрацювання знімків є синтезоване зображення, що демонструє зміни, які відбулись в агроландшафті під впливом антропогенної і природної складової деградації. Про те не менш цікавим є використання бінарних зображень [7] для аналізу динаміки ерозійних процесів. Математичним апаратом в таких дослідженнях є морфологічний аналіз зображень, який базується на цифрових алгоритмах обробки запропоновані Розенфельдом А. (1972), Визильтером Ю.В. (2009) та Мельником В.М. (2009).

Для отримання максимальних характеристик зображення запропоновано здійснювати опрацювання в такій послідовності: бінаризація, сегментація та морфолого-планіметричні визначення. Зміст бінаризації полягала у тому що світлі плями, які показують вихід ґрунтовірних порід на поверхню можна відділити за відомим методом проф. Соколова В.М. з послідовним розбиттям пікселів. Такий процес є найбільш вживаним у цифровій фотограмметрії. Відповідний математичний апарат поданий у статті [7]. На рис. 10 подано тестове зображення, яке було опрацьоване з допомогою даного алгоритму, який частково реалізований в програмному продукті „STIMAN”.

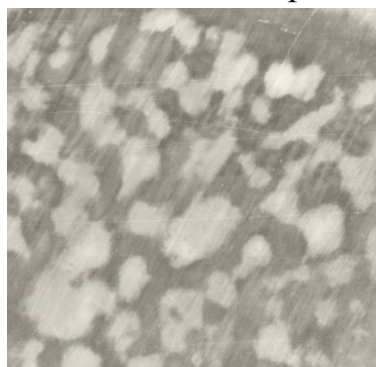


Рис. 10. Фрагмент ділянки аерофотознімка

Зважаючи на те, що розвиток рельєфу безпосередньо пов'язаний з геоморфологічними характеристиками досліджуваної території, можна стверджувати, що метод карт пластики рельєфу – фундаментальна складова комплексної оцінки території, в тому числі, елементів процесів змиву.

Для дослідження та аналізу на макрорівні характерних особливостей прояву і поширення водної ерозії (шість південних районів Волинської області) нами було використано картографічну базу даних про географічні об'єкти, явища і процеси, що включає множину цифрових тематичних карт, створених на основі електронних карт-основ (картографічна база атрибутівних даних: оцифровані нами топографічні карти масштабу 1:100000,

1:25000, 1:10000). 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 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 та 12,3 т/га/рік (Поліська філія Інституту ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського) відповідно.

В процесі розробки картографічного супроводу ерозійних процесів в межах території Волинського Опілля були використані такі способи тематичного картографічного зображення: картограма і картодіаграма (спосіб кількісного фону). За цими способами з використанням статистичних матеріалів побудовано тематичні карти фактичних модулів і обсягів змиву ґрунту (рис. 11), карти змитості сільськогосподарських угідь, ріллі, ступенів освоєності та розорюваності території.

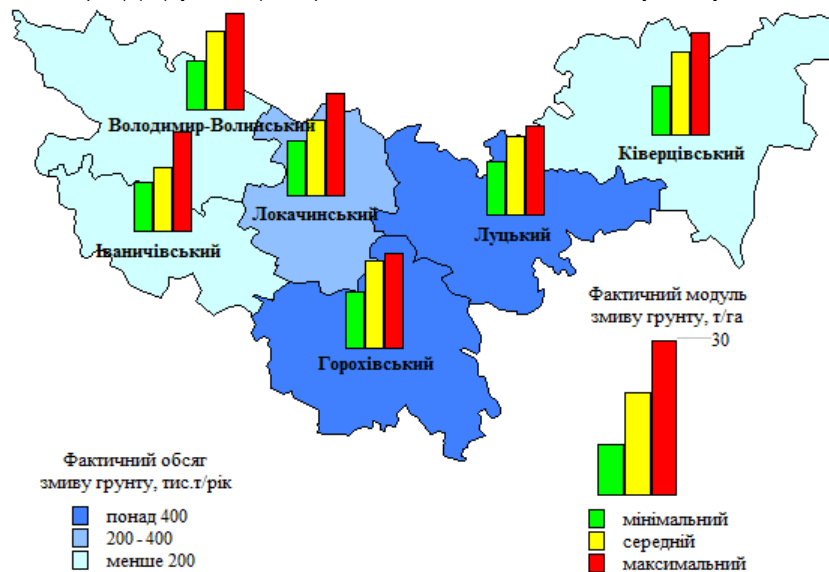


Рис. 11. Модулі і обсяги змиву ґрунту (в розрізі адміністративних районів)

Відомі широкому загалу тематичні карти, зазвичай, містять набір даних, що складається з одної-двох характеристик зображуваного явища. Проте у випадку з ерозійними процесами виникає потреба комплексного аналізу більшої кількості факторів (рельєф, ґрунти, опади, агрофон, обробіток ґрунту тощо) з встановленням взаємозв'язків між ними та їх просторового розміщення. Для вирішення такого завдання нами вперше запропоновано використання способу анаморфованого картографування.

Запропоновані в літературі алгоритми побудови таких карт є утрудненими у зв'язку із способом їх створення (графо-аналітичний). Відповідно за запропонованим в дисертації удосконаленим математичним алгоритмом, який вперше реалізували Гусейн-Заде С. М. і Тикунов В. С. (1990), виконано інтегрування розробки в програмний модуль ArcGIS. Як результат побудовано серію тематичних анаморфованих карт в межах Волинського Опілля (створено анаморфозу у розрізі адміністративних районів Волинської області (рис. 12) з фактичними модулями змиву ґрунту, з тематичним навантаженням площ еродованих земель, розподіл змитих сільськогосподарських угідь від загальної площі (картограма) та відсотки сільськогосподарських угідь за ступенем змитості (картодіаграма), землі різного ступеня змитості та орних ґрунтів з ілюстрацією їх розподілу за крутизною схилів, стан еродованих земель тощо).

Запропоновані нами анаморфовані тематичні карти є вдалою наочною ілюстрацією зображуваного процесу змиву ґрунтів. Це є ефективним способом



інтерпретації, що визначає доцільність, оперативність та ефективність використання запропонованих карт для оцінки ерозійно-небезпечних або інших земель, які піддаються різним негативним руйнівним процесам. Перевага анаморфованих карт полягає в тому, що вони можуть використовуватись як на етапі обґрунтування досліджень (аналітичні карти), так і на підсумковому етапі при отриманні результуючих показників (карти-висновки).

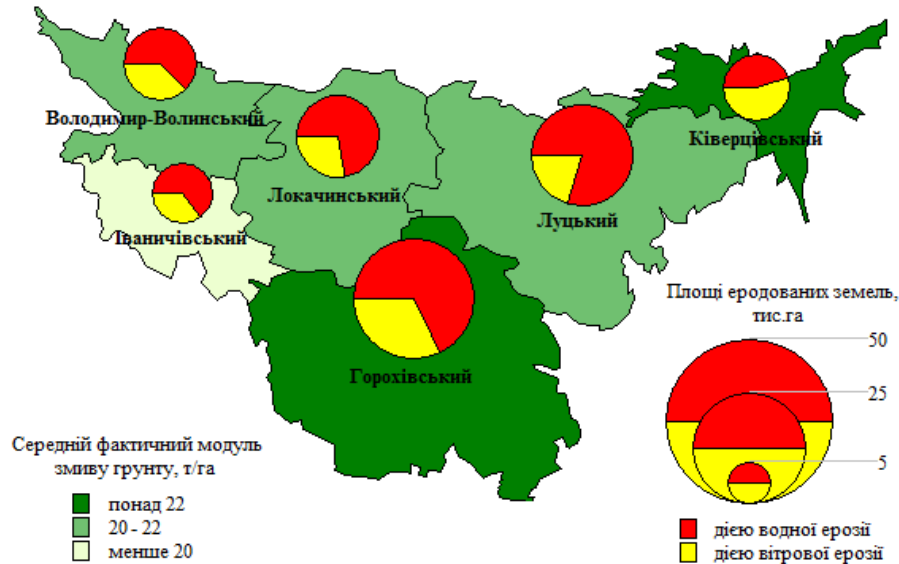


Рис. 12. Анаморфована карта фактичних обсягів змиву ґрунту в розрізі адміністративних районів Волинської області

Завершальним етапом досліджень стала розробка алгоритму використання запропонованих методів під час розробки рекомендацій до впровадження комплексів протиерозійних заходів, що повністю виправдовує значний обсяг проведених польових та лабораторних досліджень.

## ВИСНОВКИ

Отримані теоретичні та практичні результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. Із аналізу статистичних та архівних матеріалів встановлено тенденції зміни еродованості ґрунтового покриву Волинського Опілля (Волинської височини). За 25 років площа еродованих земель збільшилася на 50,0 тис. га, а середньорічний темп приросту становить 2%.

Проаналізовано основні чинники водної ерозії ґрунтів для досліджуваної території. Домінуючим в регіоні випукло-ввігнуті круті (3-7°) довжиною 50-300 м схили, які розорюються протягом 200-250 років; слабо протидіючі змиву ґрунту – дерно-підзолисті ґрунти і чорноземи опідзолені; часті зливи та інтенсивність сніготанення; 53-64% в окремих випадках до 90 % ріллі уражено площинною ерозією. Результати аналізу використані при розробці регіональних моделей з визначення середніх багаторічних втрат ґрунту, функціонування яких ґрунтується на напівемпіричних співвідношеннях, з акцентом на перевірку співвідносності результатів обчислювальних експериментів і даних спостережень.

2. Запропоновано використовувати наземне стереофотограмметричне знімання та методи растрової електронної мікроскопії (РЕМ-мікроскопії) для досліджень площинного змиву та морфологічних властивостей ґрунту. Використовуючи короткобазисну фотограмметрію запропоновано оригінальну методику визначення параметрів математичного рівняння змиву RUSLE через суперпозицію субмоделей-чинників на основі R-функцій. Складено відповідний

програмний модуль „EROSION”. Розроблено, реалізовано та верифіковано ґрунтознавчо-гранулометричну модель водної ерозії ґрунтів, що адаптована до умов Волинської височини.

3. Розроблено нове теоретичне, алгоритмічне і програмне обґрунтування сучасного методу дослідження ерозії ґрунту за допомогою PEM – програма морфологоспектрального аналізу, що дозволяє в автоматичному режимі визначати найбільш піддатливу тверду фазу скелета ґрунту (частота Найквіста). В нашому випадку це частки з діаметрами 81 мкм, що властиво ґрунтам з низькою і сильно змінюваною міцністю зв'язків, яке зумовлює рівноймовірне порушення структурних елементів практично будь-якого рівня організації (чорноземи та дерново-підзолисті ґрунти).

4. Обґрунтовано доцільність і необхідність проведення досліджень водно-ерозійних процесів на базі типових ділянок багаторічних моніторингових спостережень – комплексних регіональних геостаціонарах. Для забезпечення належного рівня проведення комплексних моніторингових досліджень використано комплексний регіональний геостаціонар площею 450 га (Заборольська сільська рада, Луцький район) на території якого виконано топографічне знімання та складено топографічний план в масштабі 1 : 2 000 з січенням рельєфу – 1 м.

5. Вперше запропоновано здійснювати виділення ерозійно-небезпечних територій із застосуванням карт пластики рельєфу. Проведено теоретичне обґрунтування та розроблено алгоритми побудови карт пластики рельєфу, що дозволяє за допомогою морфоізограф відобразити впорядковану, генетично обґрунтовану системну будову земної поверхні, реальну структуру ґрунтового покриву і літологію ґрунтів, а також геохімічні потоки, ареали їх формування, транспортування і акумуляції.

6. Запропоновано методику визначення планового розподілу ерозійних „плям” на сільськогосподарських землях на основі опрацювання бінарних зображень матеріалів аерофотознімання із застосуванням методів морфолого-планіметричного аналізу. В результаті встановлені локації можливого виходу ґрунотвірних порід на поверхню та, відповідно, обчислені статистичні розподіли „плям” на аерофотознімках за площею, периметром та фактором форми.

7. Розроблено програмний модуль побудови анаморфованих картографічних зображень, що може бути інтегрований у середовище геоінформаційної системи ArcGIS. Обґрунтовано доцільність та ефективність застосування тематичних анаморфованих карт для забезпечення моніторингових досліджень ерозійно-небезпечних земель південних районів Волинської області. Отримано серію анаморфованих картографічних моделей, що характеризують співвідношення площ еродованих земель, обсягів змиву та втрат гумусу в межах Волинського Опілля.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

- **Стаття в науковому періодичному виданні іншої держави, яке включено до міжнародних наукометричних баз даних (Угорщина)**

1. Мендель В. Математичний формалізм трансформації радіоекологічного стану території із застосуванням матриць Маркова і PEM-мікроскопії / В. Мельник, Ю. Бліндер, В. Мендель // *Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Sciences*. – Budapest. – 2014. – 2(4), Issue 32. – P. 42-48.

- **Стаття в науковому періодичному виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз даних**

2. Мендель В. П. Застосування методів математичної морфології при дослідженні ерозійних процесів за матеріалами аерофотозйомки / В.П. Мендель // *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. – Львів. – 2017. – Вип.85. – С.76-83.

• **Статті у наукових фахових виданнях України**

3. Мендель В. П. Аналіз та класифікація моделей площинного змиву ґрунту / П. П. Король, В. П. Мендель // Вісник НУВГП. – Рівне. – 2012. – №1 (57) – С. 155-164.

4. Мендель В. П. Морфолого-спектральна оцінка параметрів гідромеханічної моделі ерозії ґрунту / В. М. Мельник, В. П. Мендель, В. Ф. Радзій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів. – 2012. – № I (23) – С. 188-192.

5. Мендель В. П. Дискретна оцінка площинної ерозії методами короткобазисної фотограмметрії / В. М. Мельник, В. П. Мендель // Інженерна геодезія: науково-технічний збірник. – Київ. – 2014. – №61 – С. 92-101.

6. Мендель В. П. Ентропійна концепція визначення рівнів ерозії ґрунту за даними РЕМ-мікроскопії / В. М. Мельник, В. П. Мендель, В. Л. Расюн // Вісник геодезії та картографії. – Київ. – 2014. – № 6. – С. 11-16.

7. Мендель В. Деякі питання ідентифікації моделей водної та вітрової ерозії / В. Мельник, В. Радзій, В. Мендель // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів. – 2013. – № I (25) – С. 139-144.

• **Публікації у збірниках матеріалів конференцій:**

8. Мендель В. П. Деякі питання дослідження ерозійно – трансформованих земель півдня Волині / В. П. Мендель // V Міжнародна науково-практична конференція студентів і аспірантів «Молода наука Волині: пріоритети та перспективи досліджень». – Луцьк. – 2011. – С.222-223.

9. Мендель В. П. Апробація моделей ерозії ґрунту за топографічним фактором / В. П. Мендель // VI Міжнародна науково-практична конференція студентів і аспірантів «Молода наука Волині: пріоритети та перспективи досліджень». – Луцьк. – 2012. – С.80-82.

10. Мендель В. П. Картографування сільськогосподарських земель в умовах прояву водної ерозії / В. П. Мендель // Вісник НУВГП. – Рівне. – 2013. – №3 – С. 41 – 42.

**АНОТАЦІЯ**

**Мендель В.П. Фотограмметричне та картографічне забезпечення оцінки стану ерозійних процесів (на прикладі Волинського Опілля).** – На правах рукопису.

Дисертацією є рукопис на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 - Геодезія, фотограмметрія та картографія. - Національний університет „Львівська політехніка” , Міністерство освіти і науки України, Львів, 2018.

Обґрунтовано доцільність використання багаторівневого підходу в дослідженні ерозійно-небезпечних земель на різномасштабних рівнях (детальний, локальний, регіональний). Запропоновано використовувати наземну стереофотограмметричну зйомку і методи растрової електронної мікроскопії (РЕМ-мікроскопії) для дослідження площинного змиву ґрунту на різних рівнях його організації.

Запропоновано нетрадиційну методіку визначення обсягів змитою ґрунту через суперпозицію субмоделей-факторів на основі R-функцій. Розроблена, реалізована і верифікована ґрунтознавчо-гранулометрична модель водної ерозії ґрунтів, яка адаптована до умов Волинської височини.

Розроблено програмний модуль побудови анаморфованих картографічних зображень. Обґрунтовано доцільність і ефективність застосування тематичних анаморфорованих карт для забезпечення моніторингових досліджень ерозійно-небезпечних земель південних районів Волинської області.

Вперше запропоновано здійснювати виділення ерозійно-небезпечних територій із застосуванням карт пластики рельєфу. Проведено теоретичне обґрунтування і вдосконалені алгоритми побудови карт пластики рельєфу.

**Ключові слова:** наземне стереофотограмметричне знімання, ґрунтознавчо-

гранулометрична модель, растрова електронна мікроскопія; стереолого-планіметричний аналіз.

### АННОТАЦІЯ

**Мендель В.П. Фотограмметрическое и картографическое обеспечение оценки состояния эрозионных процессов (на примере Волынского Ополья). – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 - Геодезия, фотограмметрия и картография. - Национальный университет „Львовська политехніка”, Министерство образования и науки Украины, Львов, 2018.

Проведенный анализ и классификация математических моделей и методов исследования водной эрозии, установленные доминирующие факторы их проявления, установлены критические тенденции динамики плоскостной эрозии почвенного покрова для конкретных региональных условий юга Волыни.

Обоснована целесообразность использования многоуровневого подхода в исследовании эрозионно-опасных земель на разномасштабных уровнях (детальный, локальный, региональный). Предложено использовать наземную стереофотограмметрическую съемку и методы растровой электронной микроскопии (РЭМ-микроскопии) для исследования плоскостного смыва почвы на разных уровнях его организации.

Обоснована целесообразность использования фотограмметрических методов исследования плоскостной эрозии и свойств почв как оперативного аналога соответствующих классических исследований (короткобазисна фотограмметрия - стоковые площадки, РЭМ-микроскопия - почвоведческих исследования).

Предложена оригинальная методика определения параметров математического уравнения смыва через суперпозицию субмоделей-факторов на основе R-функций. Поиск неизвестных параметров R-функций предложено осуществлять путем использования натуральных наблюдений, полученных методом короткобазисной фотограмметрии. Компьютерная интерпретация предложенных алгоритмов положена в основу созданного программного модуля "EROSION". Достоверность определения параметров R-функций ( $\alpha_j, a_j, b_j, c_j, d_j$ ) в пределах 5-8%.

Разработана методика изучения порового пространства эрозионно податливых почв средствами РЭМ-микроскопии. В результате растрово-электронно-микроскопических и лабораторных исследований получены конкретные уравнения регрессий и корреляционных зависимостей общей пористости типичных почв Волынского Ополья: черноземов и дерново-подзолистых почв. На основе полученных параметров (коэффициент порового пространства, площадь и периметр пор) разработана, реализована и верифицирована почвоведческо-гранулометрическая модель водной эрозии почв, адаптированная к условиям Волынской возвышенности. Результаты проведенных исследований подтвердили важность морфологических характеристик грунтов. Точность верификации модели порядка 85%.

Разработано теоретическое, алгоритмическое и программное обоснования современного метода исследования эрозии почвы с помощью РЭМ - программа морфологоспектрального анализа. Это позволяет в автоматическом режиме определять наиболее подверженную твердую фазу скелета грунта (частота Найквиста). В нашем случае это частицы с диаметрами 81 мкм, собственно почвы с низкой и сильно изменяемой прочностью связей, которое приводит к равновероятному нарушению структурных элементов практически любого уровня организации (черноземы и дерново-подзолистые почвы).

Впервые предложено осуществлять выделение эрозионно-опасных территорий с применением карт пластики рельефа. Проведено теоретическое обоснование и

усовершенствованы алгоритмы построения целой серии тематических карт (3 разнотипных по морфометрической структуре картографические модели), которые по своей сути являются пионерскими в отечественной тематической картографии. Разноплановая практическая апробация теоретико-экспериментальных исследований осуществлена на опытном полигоне - комплексном региональном геостационаре площадью 450 га.

Разработан программный модуль построения анаморфированных картографических изображений. Обоснована целесообразность и эффективность применения тематических анаморфированных карт для обеспечения мониторинговых исследований эрозионно-опасных земель южных районов Волынской области. Предложено использовать разработанный программный модуль построения анаморфированных картографических изображений интегрирован в среду геоинформационной системы ArcGIS.

Разработан алгоритм использования предложенных в диссертации методов при разработке рекомендаций к внедрению комплексных противоэрозионных мероприятий. Предложенная современная концепция поэтапных модификаций по подбору коэффициентов позволяет оперативно реагировать на изменения интенсивности смыва, с высокой вероятностью прогнозировать (около 90%) и, соответственно, спрогнозировать развитие деградации почвенного покрова, значительно улучшив экологическое состояние окружающей среды на региональном уровне. Предложенный комплексный подход позволяет формировать экологически сбалансированные агроландшафты на региональном уровне.

**Ключевые слова:** наземная стереофотограмметрическая съемка, почвоведческо-гранулометрическая модель, растровая электронная микроскопия; стереолого-планиметрический анализ.

#### ANNOTATION

**Mendel V.P. Photogrammetric and cartography software assessment of erosion processes (for example Volyn Opole).** – The manuscript.

The thesis is a manuscript for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.24.01 - Geodesy, Photogrammetry and Cartography. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

It was established the expediency of using a layered approach to study erosion-dangerous lands at the different levels (detailed, local, regional).

It was suggested to use terrestrial stereophotogrammetrical removal and methods of raster electronic microscopy (REM-microscopy) for research planar flushing the soil at different levels of its organization.

It was offered unconventional methodology of determination of volumes of the washed off soil is offered through superposition of submodels-factors on the basis of R-functions. It was developed, the grain-size for soil science model of water erosion of soils, which is adapted to the terms of Volyn sublimity, is realized and verified.

It was developed the programmatic module of construction of anamorphic cartographic images is worked out. Expediency and efficiency of application of thematic anamorphic maps are reasonable for providing of monitoring researches of erosive-dangerous earth of south districts of the Volyn region.

It was first suggested to carry out the selection of erosive-dangerous territories with application of maps of the plastic relief arts. A theoretical ground was conducted and the algorithms of construction of maps of the plastic relief arts were worked out.

**Key words:** surface stereo photogrammetrical output, grain-size for soil science model, raster electronic microscopy; stereologo-planimetric analysis.