

МОДЕЛЮВАННЯ ВОДНО-ДЕФЛЯЦІЙНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ СТЕПОВИХ ҐРУНТІВ УКРАЇНИ

Пічуря В.І., Потравка Л.О., Дудяк Н.В., Рутта О.В.
Херсонський державний аграрно-економічний університет
вул. Стрітенська, 23, 73006, Херсон
pichuravitalii@gmail.com

В статті представлені результати просторового моделювання водно-дефляційної деструкції степових ґрунтів. Більше 50% сільськогосподарських земель України постійно зазнають негативного ерозійного впливу, що призводить до значних незворотних еколого-економічних наслідків деструкції ґрунтового покриву. Дослідження проведені на території зони Степу України загальною площею – 167,4 тис. км², в т.ч. площа сільськогосподарських угідь – 131,6 тис. км². Використано методику оцінки водно-ерозійної небезпеки ґрунтів із застосуванням модифікованої моделі RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation); методику розрахунку втрат ґрунту від вітрової ерозії та визначення ступеня еродованості ґрунтів. Просторове моделювання здійснено із застосуванням методів геостатистики та алгебри карт програмного продукту ArcGIS 10.6. Розраховано, що близько 32,7% площі ріллі розташованої в західній і південно-західній частинах зони Степу України мають підвищену водно-ерозійну небезпеку. Зокрема, близько 40% площі ріллі в центральній і південно-східній частинах зони Степу України мають сильну і дуже сильну ступінь прояву дефляційних процесів. В результат комплексного просторового моделювання встановлено, що близько 68,7% площі ріллі постійно піддаються комплексній дії ерозійних процесів, зокрема площа слабоеродованої ріллі складає 16,8%, середньо- та сильноеродовані – 22,1%. В результаті еродованості ґрунтового покриву спостерігається перехід площі сільськогосподарських земель із категорії високої та середньої якості у категорію середньої, низької та дуже низької якості. Визначено, що в середньому на слабоеродованих ґрунтах недобір врожаю сільськогосподарських культур складає 15–20%, на середньоеродованих – 20–40% і на сильноеродованих – до 70%. З метою захисту ґрунтів, підвищення їх родючості та підвищення урожайності сільськогосподарських культур в зоні Степу України запропоновано заходи адаптивно-ландшафтного протиерозійного проєктування з елементами ґрунтозахисного землеробства у відповідності до просторової диференціації якості ґрунтів та ступеню проявів водно-дефляційної ерозійної небезпеки. *Ключові слова:* водна ерозія, вітрова ерозія, еродованість ґрунтів, степові ґрунти, ГІС-технології, моделювання.

Modeling of water deflation destruction of steppe soils of Ukraine. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Rutta O.

The article is presented the results of spatial modeling of water-deflation destruction of Steppe soils. More than 50% of the agricultural land of Ukraine has been constantly exposed to negative erosion, which led to significant irreversible ecological and economic consequences of destruction of the soil cover. Studies were carried out on the territory of the Steppe zone of Ukraine with a total area of 167.4 thousand km², including the area of agricultural land – 131.6 thousand km². A method for assessing the water-erosion hazard of soils using a modified model RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) has been used; methodology for calculating soil losses from wind erosion and determining the degree of soil erosion. Spatial modeling was carried out using the methods of geostatistics and algebra of maps of the ArcGIS 10.6 software product. It is estimated that about 32.7% of the arable land area located in the western and southwestern parts of the Steppe zone of Ukraine has an increased risk of water erosion. In particular, about 40% of the arable land in the central and southeastern parts of the Steppe zone has a strong and very strong degree of manifestation of deflationary processes. The result of complex spatial modeling has been found that about 68.7% of the area of arable land is constantly subjected to the complex action of erosion processes, in particular, the area of poorly eroded arable land was 16.8%, medium and strong eroded – 22.1%. As a result of soil erosion, there was a transition of agricultural land area from the category of high and medium quality to the category of medium, low and very low quality. It was determined that, on average, crop yield loss is 15–20% on slightly eroded soils, 20–40% on moderately eroded soils, and up to 70% on heavily eroded soils. In order to protect soils, increase their fertility and increase the yield of crops in the Steppe zone of Ukraine, measures of adaptive-landscape anti-erosion design with elements of soil protection farming in accordance with the spatial differentiation of soil quality and the degree of manifestations of water deflation erosion hazard have been proposed. *Key words:* water erosion, wind erosion, soil erosion, steppe soils, GIS technologies, modeling.

Постановка проблеми. Найбільш потужними факторами деструкції ландшафтів, причиною зниження родючості ґрунтів і порушення продовольчої безпеки країни є водна та вітрова ерозії. Близько 13,3 млн га (31,3%) сільськогосподарських земель України, у т.ч. 32,6% (10,6 млн га) ріллі, постійно зазнають негативного впливу водної ерозії. Землі із середньо- та сильнозмитим ступенем ґрунтів складають 4,5 млн га (13,8% ріллі), із них 1,5% повністю втратили гумусовий горизонт. Вітровій ерозії систематично піддається 18,5% ріллі, пиловим бурям –

61,5%. Щорічне зростання площ еродованої ріллі загалом в Україні сягає 60–80 тис. га [1]. В цілому, понад 1,1 млн га земель відносяться до деградованих, малопродуктивних та техногенно забруднених земель, більше 140 тис. га до категорії порушених земель, близько 320 тис. до га малопродуктивних угідь, які першочергово підлягають консервації, потребують рекультивациі та поліпшення [2].

Ерозійні процеси призводять до погіршення фізичних властивостей ґрунту, зменшення і повного знищення гумусового горизонту, в результаті

чого відбувається значне зменшення запасів гумусу, макро- і мікроелементів, погіршення родючості ґрунтів, що є причиною зниження значень бонітету зональних ґрунтів, зменшення урожаїв сільськогосподарських культур до 60% та зростання витрат на агротехнологічні заходи [3, 4]. В результаті досліджень встановлено, що обсяг виносу гумусу становить 310–460 кг з 1 га ріллі, азоту – 9,0–28,0 кг/га, фосфору – 21–28 кг/га, калію – 180–370 кг/га. За останні 100 років вміст гумусу в чорноземах зменшився з 13–14% до 3–5% [5].

Відсутність регулярного, рівномірного надходження мінеральних добрив у необхідній кількості, прояви вітрової та водної ерозії, включаючи іригаційну, і дефляції ґрунтів, а також тривале зрошення в зоні Степу України призвели до зменшення вмісту гумусу в середньому на 0,36%, обмінного калію на 18%, рухомого фосфору на 34,17%, нітрифікаційного азоту на 17,0% [6, 7]. За результатами нейромодельовання прогнозується [8] процес поступової дегуміфікації ґрунтів: на богарних землях – на 0,01%, на зрошуваних землях – на 0,03 % в рік і скорочення площ земель, які характеризуються середнім і підвищеним вмістом гумусу. Зазначені показники свідчать про суттєві відхилення, оскільки для збільшення гумусу в ґрунті на 0,1% в природних умовах необхідно 25–30 років. Значний негативний вплив ерозії проявляється на всіх компонентах ландшафтних структур, в результаті чого втрати сільськогосподарської продукції перевищують 2,7–3,7 ц/га зернових одиниць [9]. Тому, моделювання водно-дефляційної деструкції ґрунтів, визначення частоти прояву ерозійних процесів та неоднорідності їх просторового розподілу повинно стати основою для розрахунку

еколого-економічних збитків, обґрунтування ефективності ведення сільського господарства, розробки природоохоронних заходів з подальшим впровадженням адаптивно-ландшафтною протиерозійної організації території з елементами ґрунтозахисного землеробства.

Мета дослідження. Здійснити просторове моделювання водної та вітрової ерозії із застосуванням ГІС-технологій, встановити сумарний вплив ерозійних процесів на рівень деструкції степових ґрунтів, запропонувати заходи адаптивно-ландшафтного протиерозійного проєктування з елементами ґрунтозахисного землеробства.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження проведені на території зони Степу України (рис. 1) загальною площею – 167,4 тис. км², в т.ч. площа сільськогосподарських угідь – 131,6 тис. км². Сільськогосподарська освоєність регіону варіює в межах 20–97%.

Розрахунок втрат ґрунту від водної ерозії. Для моделювання водно-ерозійних втрат ґрунтів використана модифікована емпірично-статистична модель RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) [10, 11]:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

де, A – середня багаторічна величина змиву від стоку дощових вод, т/га на рік; R – середньобогаторічний ерозійний потенціал опадів (ЕПО), умовні одиниці; K – змивання (еродованість) ґрунту, т/га на одиницю ЕПО; LS – фактор рельєфу; C – ерозійний індекс культури або сівозміни у цілому; P – коефіцієнт ґрунтозахисної ефективності протиерозійних заходів.

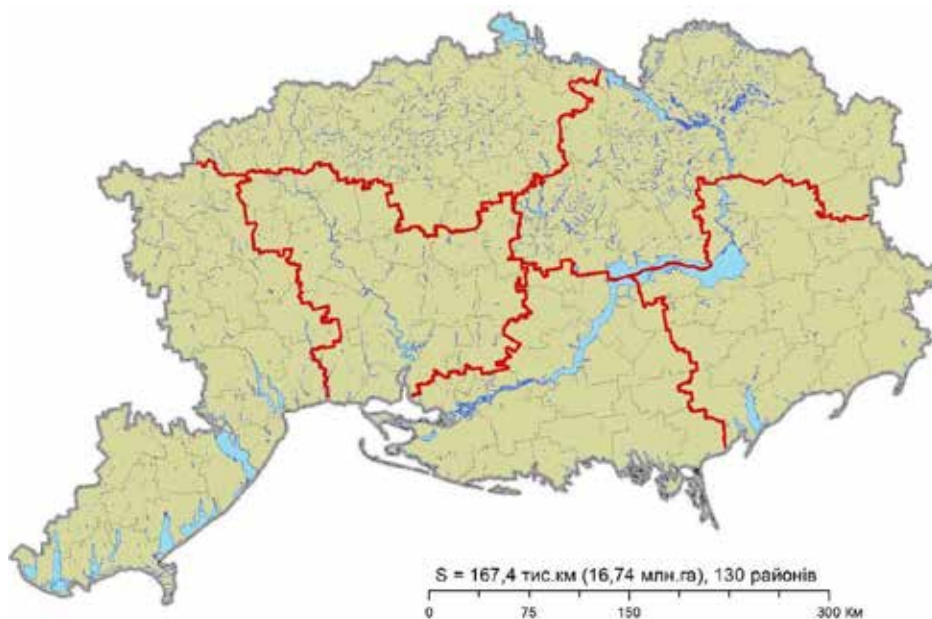


Рис. 1. Просторова характеристика території досліджень

Модель *RUSLE* використана в середовищі ГІС ліцензійного програмного продукту ArcGIS 10.1, для цього були створені растрові моделі (розмір чарунки 30×30 м.) кожного інтегрованого фактору моделі водної ерозії ґрунтів в зоні Степу України. Просторова модель середньорічного потенціалу дощових опадів (*R*) була отримана на основі екстраполяції декомпозицій даних картограм ерозійного індексу опадів [12]. При визначенні фактору еродованості ґрунтового покриву або фактор піддатливості ґрунтів ерозійним процесам (*K*) здійснена векторизація ґрунтових карт зони Степу України. Для кожного ґрунтового різновиду із урахуванням їх гранулометричного складу у відповідності до класифікації коефіцієнтів еродованості ґрунтів (т/га на рік) був розрахований параметр *K* і отримана просторова растрова модель.

Оцінку ерозійного потенціалу рельєфу (*LS*) здійснено за допомогою просторового аналізу гідрологічно-коректної цифрової моделі рельєфу (ЦМР) визначені морфометричні характеристики рельєфу і побудовані растрові картограми довжин (*L*) і ухилів (*S*) поверхні із використанням робочого модуля Hydrology tools of Spatial Analyst Tools і Surface of Spatial Analyst Tools, після чого з використанням модуля Raster Calculator, розраховували значення *LS* для кожного пікселя за формулою [10]:

$$LS = L^{0.5} \cdot (0,0011 \cdot S^2 + 0,0078 \cdot S + 0,0111) \quad (2)$$

Коефіцієнт рослинного покриву (*C*) разом з фактором *LS* є найбільш чутливим до втрати ґрунту [13, 14]. При збільшенні рослинності, втрати ґрунту зменшуються. Для визначення фактору *C* були використані дані дистанційного зондування землі (ДЗЗ) коректно каліброваного супутникового знімку *Landsat-8* із геометричним розрізненням (просторовим дозволом) ~ 30×30 м станом на березень і серпень місяць 2020 року. Генерація значень *C* фактора проводилася на основі безрозмірного показника NDVI (нормалізованого диференціального вегетаційного індексу), для цього використана формула [15]:

$$C = \exp(-\alpha((NDVI) / (\beta - NDVI))) \quad (3)$$

де, α і β – безрозмірні параметри, які визначають форму кривої, що відноситься до NDVI і *C* фактора. Параметри α і β мають значення 2 і 1 відповідно. Коефіцієнт ґрунтозахисних заходів (*P*) брали за 1, припускаючи, що додаткові заходи не проводилися.

Розрахунок втрат ґрунту від вітрової ерозії. Для визначення можливих втрат ґрунту на території Степу України використано модель вітрової ерозії ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського», яка адаптована до різних фізико-географічних умов країни [16-18]:

$$E_p = \frac{10^{a-bk} \cdot 0,1K_s \cdot V_{av,max}^3 \cdot t \cdot K_{spe}}{V_{aer}^3} \quad (4)$$

де, E_p – потенційно можливі дефляційні втрати ґрунту, т/га за рік; a , b – степеневі коефіцієнти, які залежать від генезису, гранулометричного складу, щільності і деяких інших властивостей ґрунтів (розраховані експериментально); k – грудкуватість поверхневого (0-3 см) шару ґрунту (вміст агрегатів або часток більше 1 мм), %; K_s – коефіцієнт руйнування агрегатів поверхневого шару ґрунту під впливом ударів ґрунтових часток та їх стирання повітряно-пиловим потоком; $V_{av,max}$ – середня максимальна швидкість вітру при пилових бурях 20-ої забезпеченості, м/сек (20% забезпеченість показує, що цей показник, визначений за багаторічними даними, вірний у 80 випадках із 100, тобто тільки у 20% випадків швидкість вітру при пилових бурях буде більшою); t – середня кількість годин з проявленням вітрової ерозії за рік за багаторічними даними; K_{spe} – коефіцієнт ґрунтозахисної ефективності протидефляційних заходів; V_{aer} – базова швидкість потоку в аеродинамічній установці, яка дорівнює 23 м/сек у перерахуванні на висоту флюгера (10 м); θ, I – перерахування з г/м² за 5 хвилин у т/га за рік.

Просторові моделі розподілу величини коефіцієнтів регресій (a , b), грудкуватості (k) та коефіцієнтів руйнування (K_s) створені на основі присвоєння відповідних значень кожному ґрунтовому різновиду зони Степу України (рис. 2). Растрові моделі просторового розподілу середньої максимальної швидкості вітру при пилових бурях ($V_{av,max}$), а також середньої кількості годин з проявленням вітрової ерозії за рік (t) на території степових ґрунтів отримані на основі екстраполяції декомпозицій даних метеорологічних картограм за усередненими даними 1990–2020 рр.

Коефіцієнт ґрунтозахисної ефективності проти дефляційних заходів (K_{spe}) розраховано за модифікованим ерозійним індексом культури або коефіцієнту рослинного покриву (C') за формулою:

$$C' = C / \max(C) \quad (5)$$

Значення C розраховується за формулою 3. Значення C' знаходиться в діапазоні від 0 (максимальна протидефляційна дія рослинного покриву) до 1 (мінімальна або відсутня протидефляційна рослинність).

Розрахунок еродованості ґрунтового покриву. Ступінь еродованості ґрунтового покриву території окремих адміністративно-територіальних одиниць (районів) визначався за коефіцієнтом еродованості ґрунтового покриву за формулою [19]:

$$K = \frac{S_0 + 1,2S_1 + 1,57S_2 + 2,58S_3}{\sum S} \quad (6)$$

де, K – коефіцієнт еродованості ґрунтового покриву (території); S_0 , S_1 , S_2 , S_3 – площі, відповідно, нееродованих, слабоеродованих, середньоеродованих та сильноеродованих ґрунтів, га або %; $\sum S$ – загальна площа території, га або 100%; 1,2,

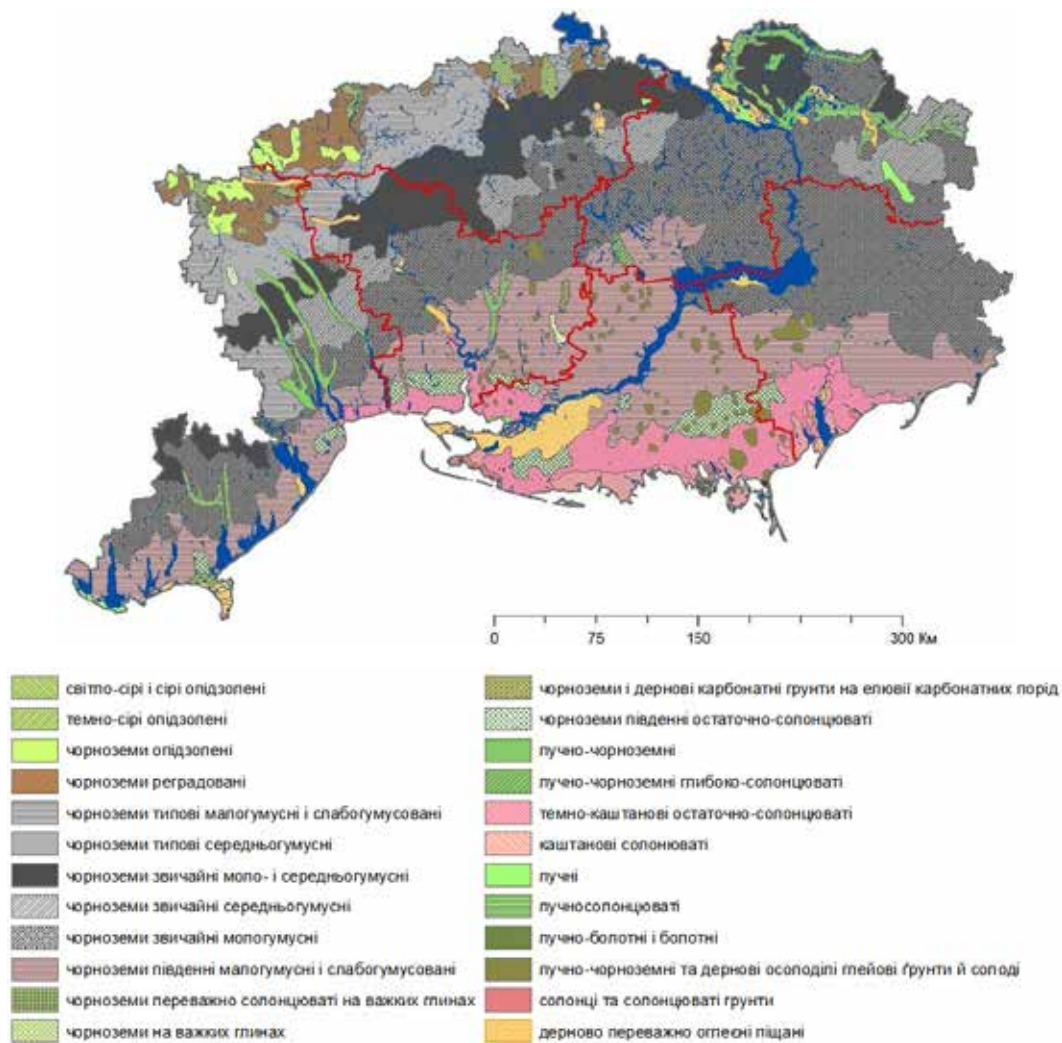


Рис. 2. Типи ґрунтів на території степових регіонів досліджень

1,57, 2,58 – відповідно коефіцієнти слабоеродованих, середньоеродованих та сильноеродованих ґрунтів.

Еродованість ґрунтового покриву (території районів) здійснено за класифікацією: нееродований ($K=1,0$), дуже слабоеродований ($K=1,0-1,05$), слабоеродований ($K=1,05-1,15$), середньоеродований ($K=1,15-1,25$), сильноеродований ($K=1,25-1,40$), дуже сильноеродований ($K>1,40$).

Просторове моделювання водно-дефляційної деструкції степових ґрунтів здійснено в середовищі ГІС ліцензійного програмного продукту ArcGIS 10.6.

Виклад основного матеріалу. Моделювання водно-ерозійної деструкції степових ґрунтів. В результаті моделювання визначено просторова неоднорідність диференціації основних факторів водно-ерозійної деструкції ґрунтів в зоні Степу України: ерозійний потенціал опадів (R) рівномірно збільшується з півдня на північний захід від 5,4 до 8,8; потенційні щорічні втрати родючого верхнього шару ґрунту (K) залежно від ерозійного потенціалу опадів зменшується з північного сходу на пів-

день від 3,6 до 1,2 т/га, значення ерозійного індексу культури (C) варіюють від 0 до 1,4 в напрямку із півночі на південь; значення фактора рельєфу (LS) варіює від 0,2 до 1,8, найбільшу ерозійну небезпеку рельєфу мають сільськогосподарські землі північно західної частини зони Степу України. В результаті ГІС-моделювання із використанням модифікованої моделі *RUSLE* була проведена оцінка ерозійної небезпеки, розраховано потенціал щорічних ґрунтових втрат на ріллі (рис. 3а). Виокремлено близько 4304,5 тис. га орних земель, які мають підвищену (більше 2 т/га на рік) ерозійну небезпеку (32,7 % від загальної площі ріллі).

Умовно ерозійно безпечні землі належать до рівнинних та буферних границь вододільних частин схилів і складають 67,3 % загальної площі ріллі, але й вони піддаються процесам водної ерозії [20].

Близько 48 адміністративно-територіальних одиниць (рис. 3б), які в більшій мірі розташовані в північній частині степового регіону досліджень, мають питому площу менше 5 % ерозійно порушених

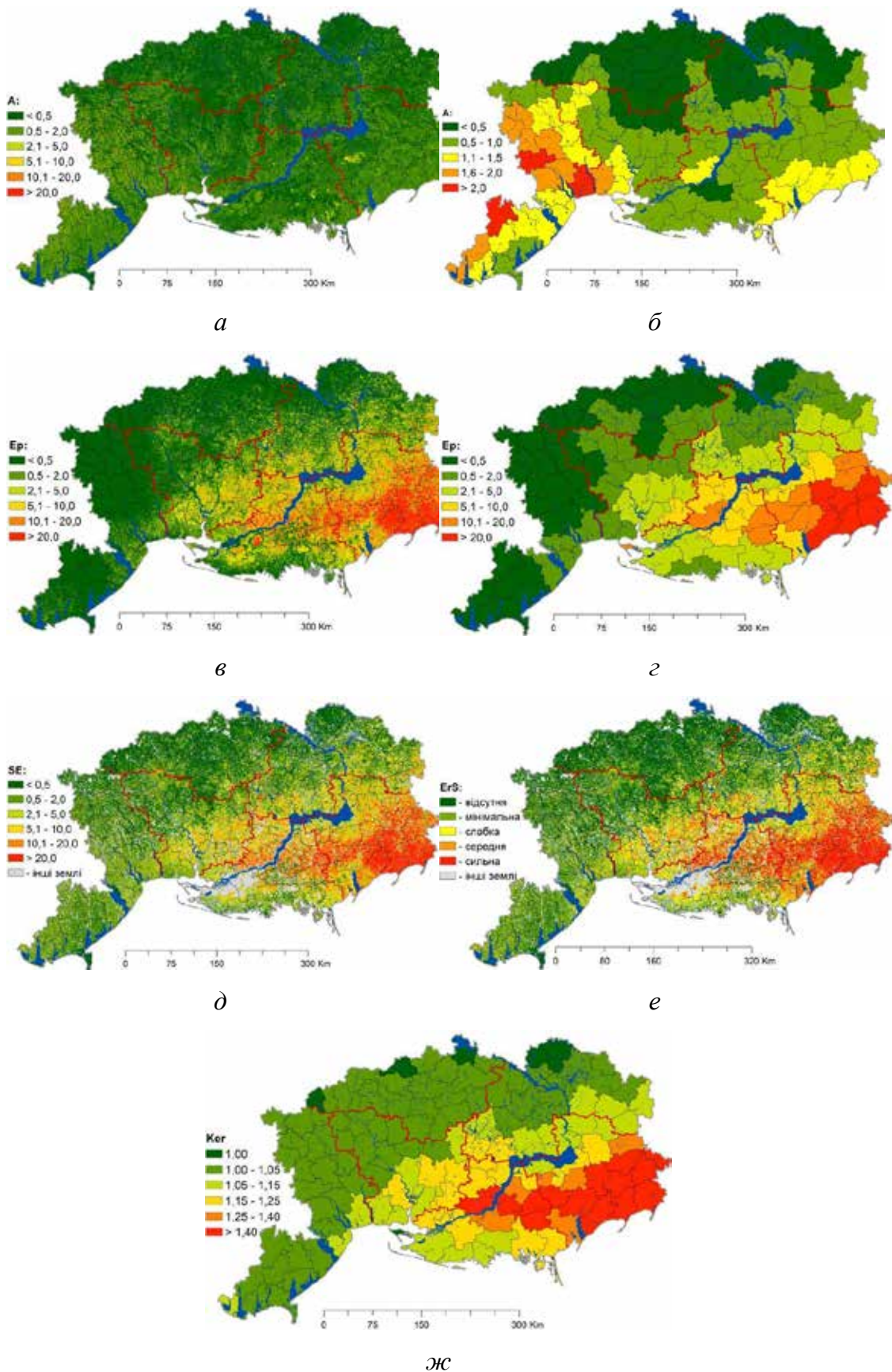


Рис. 3. Просторовий розподіл сумарних втрат ґрунту (т/га на рік) від водно-дефляційної деструкції ґрунтів зони Степу України: а, б – водно-ерозійна деструкція (A); в, г – дефляційна деструкція (Er) ; д – сумарна деструкція ґрунту (SE); е – ступінь еродованості ґрунтів (ErS); ж – коефіцієнт еродованості ґрунтів (Ker)

земель і характеризуються стійким типом агроландшафтів до водно-ерозійних процесів.

Переважає більшість адміністративно-територіальних одиниць із високим ерозійно-аккумулятивним потенціалом, де частка площі складає більше 15% розміщені в західній і південно-західній частинах зони степу України, питома вага площі ерозійно небезпечних земель в окремих адміністративно-територіальних одиницях досягає 32%.

Моделювання дефляційної деструкції степових ґрунтів. Встановлено, що збільшення амплітуди коливання температури повітря та ґрунтів, зниження суми річних опадів [21], гідротермічного коефіцієнту, скорочення безморозного періоду, посилення активності вітру, сприяють розвитку дефляційних процесів, що визначається проявами ерозійно небезпечного клімату, який обумовлюється континентальністю [22]. Значні прояви вітрової ерозії властиві аридним і семіаридним зонам, які мають незначну кількість опадів, високу температуру повітря і ступень випаровуваності, посилені сильними вітрами і низькою диференціацією рослинної захищеності. В першу чергу, у зоні посилення вітрово-ерозійних процесів знаходяться ґрунти зони Степу, які характеризуються легким гранулометричним складом, низькою швидкістю ґрунтоутворення, середнім та низьким рівнем вмісту гумусу, слабкою зв'язністю і міцністю ґрунтової грудки. На степовому, переважно рівнинному рельєфі, вітер набуває великої швидкості, що спричиняє збільшення ударної сили переносу частинок. Прояви дефляційної деструкції ґрунтового покриву пов'язані з факторами вітру (швидкість, частота повторення, його сила і тривалість); особливостями земної поверхні (рослинність, його висота і щільність покриву, нерівність поверхні, наявність ґрунтової вологи), специфікою ґрунтів (розмір ділянок, їх зв'язаність, розподіл агрегатів і кількості органічної речовини) [18, 23, 24]. Внаслідок вітрової ерозії у відкритих степових ландшафтах щороку пошкоджується 5-6 млн. га родючих земель. Найбільш активна і шкідлива форма вітрової ерозії виникає у степовій та частково лісостеповій зонах за швидкості вітру понад 12-15 м/с. Дослідниками встановлено, що низька ефективність існуючих контурно-меліоративних протидефляційних заходів в зоні Степу України спричинила великомасштабну катастрофу 2007 року, коли близько 20% площ сільськогосподарських угідь знаходилися в епіцентрі дії пилових бур. У зв'язку з цим, втрат ґрунту становили від 10 до 400 т/га [25].

В результаті просторового моделювання створені растрові моделі просторової диференціації вітрово-ерозійних факторів та розраховані дефляційні втрат ґрунту на території зони Степу України. Величини коефіцієнтів регресій (a , b), грудкуватості (k), коефіцієнтів руйнування (K_s) для основних ґрунтів України розраховано у відповідності до методики потенційних втрат ґрунту [16-18]. Дослідженнями

визначено, що коефіцієнти характеристик генезису, гранулометричного складу, щільності та інших властивостей ґрунтів степового регіону варіюють *фактор*– a від 2,3497 (дерново-підзолисті, дернові опідзолені, оглеєні, опідзолені ґрунти піщані, глинисто-піщані і супіщані ґрунти) до 4,3060 (чорноземи типові і звичайні середньо-і сильно еродовані ґрунти), *фактор*– b від 0,020 (чорноземи південні солонцюваті ґрунти) до 0,058 (чорноземи типові і звичайні середньо-і сильно еродовані ґрунти). Середнє значення *фактору*– k варіює в межах 17,5% (дерново-підзолисті, дернові опідзолені, оглеєні, опідзолені ґрунти піщані, глинисто-піщані і супіщані ґрунти) – 50,0% (сірі опідзолені, чорноземи опідзолені і солонцюваті, каштанові солонцюваті, солонці суглинкові і глинисті ґрунти), *фактору*– K_s від 0,5 (чорноземи типові і звичайні середньо-і сильно еродовані ґрунти) до 0,83 (дерново-підзолисті, дернові опідзолені, оглеєні, опідзолені ґрунти піщані, глинисто-піщані і супіщані ґрунти). Середні максимальні швидкості вітру при пилових бурях 20%-ої забезпеченості ($V_{av.max}$) зменшуються із південно-східної частини регіону досліджень до північно-східної від 26,1 до 13,7 м/с, середнє число годин у рік з пиловими бурями (t) в зоні Степу України також варіює в даному напрямку від 0 до 37,8 год. Просторова диференціація дефляційного впливу *фактору*– C' залежить від розподілу площ земель зайнятих під природною рослинністю і сільськогосподарськими культурами, а сезонне значення його варіює від 0 до 1. В результаті ГІС-моделювання із використанням моделі потенційно можливих втрат ґрунту в результаті дефляційних процесів на території зайнятих чистим паром, за відсутності протиерозійних заходів, втрати ґрунту в епіцентрі пилових бур становитимуть від 0,02 т/га до 598,3 т/га [2].

Потенційні втрати ґрунту за умов дії проти-дефляційної ефективності культури або сівозміни *фактору*– C' в порівнянні із моделлю відсутності протидефляційних заходів знижуються у 5,62 рази (рис. 3в). Встановлено, що близько 40% сільськогосподарських земель мають сильну і дуже сильну ступінь прояву дефляційних процесів, які переважно розташовані в центральній і південно-східній частинах зони Степу України (рис. 3з).

Розрахунок водно-дефляційної деструкції степових ґрунтів. На основі растрових моделей втрати ґрунтового покриву (т/га) від дії водної (рис. 3а) і вітрової (рис. 3б) ерозії, створено растрову модель просторової диференціації сумарної водно-дефляційної деструкції степових ґрунтів (рис. 3д). Розподіл сільськогосподарських земель за градацією ерозійної небезпеки представлено в таблиці 1.

До умовно ерозійно безпечних земель (31,3 % загальної площі ріллі) відносять землі рівнинних та буферних границь вододільних частин схилів із наявністю рослинного покриву біо- та агроценозів. Близько 68,7% орних земель постійно піддаються

Таблиця 1

Розподіл площ орних земель за потенційною небезпекою водно-дефляційної деструкції ґрунтів

Ерозійна небезпека	Змив ґрунту, т/га на рік	Ступінь розвитку ерозійних процесів	Площа, тис. га	Питома вага, %
Умовно відсутня	< 0,5	I категорія	4119,2	31,3
Мінімальна	0,5–2,0	II категорія	3048,4	23,2
Слабка	2,1–5,0		2404,5	18,3
Середня	5,1–10,0	III категорія	1531,0	11,6
Висока	10,1–20,0	IV категорія	1070,1	8,1
Дуже висока	> 20,0		988,9	7,5
Всього:			13162	100

Таблиця 2

Вплив ступеню еродованості ґрунтів на зміну їхніх властивостей (за одиницю прийняті властивості і показники нееродованих ґрунтів)

Властивості і показники		Еродованість ґрунтів				
		Відсутня	Мінімальна	Слабка	Середня	Сильна
Сільськогосподарські землі	тис. га	4844,3	3202,8	2210,0	1316,4	1588,6
	%	36,8	24,3	16,8	10,0	12,1
Вміст гумусу		1,0	1,00–0,95	0,95–0,75	0,75–0,50	0,50–0,30
Легкогідролізований азот		1,0	1,00–0,95	0,95–0,80	0,80–0,66	0,66–0,50
Рухомий фосфор		1,0	1,00–0,82	0,82–0,70	0,70–0,60	0,60–0,40
Обмінний калій		1,0	1,00–0,91	0,91–0,85	0,85–0,80	0,80–0,70
Об'ємна маса		1,0	1,00–1,03	1,03–1,05	1,05–1,10	1,10–1,23
Вологість в'янення рослин		1,0	1,00–0,96	0,96–0,90	0,90–0,85	0,75–0,65
Пористість (за Заславським)		1,0	1,00–0,95	0,94–0,90	0,90–0,80	0,80–0,75
Повна вологоємність (за Заславським)		1,0	1,00–0,98	0,98–0,95	0,95–0,80	0,80–0,70
Середня урожайність культур:						
– зерна		1,0	1,00–0,85	0,85–0,80	0,80–0,60	0,60–0,30
– зеленої маси		1,0	1,00–0,95	0,95–0,90	0,90–0,70	0,65–0,45

комплексній дії ерозійних процесів, зокрема: мінімальні та слабкі негативні прояви розповсюджені на 41,5% площі, середні – 11,6%, високі та дуже високі – 15,6% площі орних земель.

Таким чином, визначено, що за умов відсутності екологічно обґрунтованих протиерозійних заходів набули посилення деградаційні процеси ґрунтового покриву, які характеризуються показником еродованості. Зокрема, спостерігається перехід земель із категорії мало- та слабоеродованих у категорію середньоеродованих та сильноеродованих (рис. 3e), що обумовлено втратою найбільш родючого шару ґрунту, виносом гумусу (дегуміфікації ґрунтів) і поживних речовин, значним погіршенням фізичних властивостей ґрунтів та, в результаті, зменшенням урожайності сільськогосподарських культур. З погіршенням агрофізичних властивостей ґрунтів ще більше зростає їх схильність до ерозії, яка може привести до повної втрати гумусового горизонту та безповоротного погіршення ґрунту.

Визначено, що за останні 40 років площа еродованих земель на території України збільшилася на 2,5 млн га з щорічним розширенням еродованої

ріллі на 60–80 тис. га. В період 1960–2015 рр. площа еродованих ґрунтів збільшилася на 30–35 %; площа сильнозмитих ґрунтів зросла на 20 %; слабо- і середньо-змитих – на 2 і 12 % відповідно [5]. Площа слабо-еродованої ріллі на території Степу України складає 2,2 млн га (16,8% площі ріллі), середньо- та сильно-еродовані – 2,9 млн га (22,1%) (табл. 2).

На середньо- та сильнозмитих землях інфільтраційна можливість ґрунту зменшується до 30% і змиваємість збільшується в 1,5–2,0 рази, що призводить до акумуляції у водоймах продуктів ерозійного руйнування ґрунтів, а разом з ними – агрохімікатів, біогенів, важких металів, в тому числі, радіонуклідів. В результаті цього значно погіршується якість поверхневих вод, провокується евтрофікація акваторій, відбувається замулення малих річок, що є причиною їх зникнення.

Збільшення площ еродованих ґрунтів обумовлює ступінь деградації територіальних екосистем (одиниць) та актуалізує необхідність впровадження відповідних протиерозійних та меліоративних заходів. Для відновлення втраченої родючості еродованих ґрунтів необхідно компенсувати втрати гумусу

в результаті ерозії, тому необхідно вносити в 3 рази більше органічної речовини, ніж було змито гумусу, оскільки гуміфікується не більше 25–30 % обсягу органічних добрив та сидератів. Визначено, що ступінь еродованості ґрунтового покриву в межах окремих адміністративно-територіальних одиниць (АДТО) на рівні районів (рис. 3ж) варіює від 1,0 (нееродований) до 1,4 і вище (дуже сильноеродований): 6 АДТО (3,4% загальної площі території досліджень) відсутні еродовані землі; 63 АДТО (47,0%) мають дуже слабоеродований ступінь ґрунтового покриву; 23 АДТО (18,6%) слабоеродований ґрунтовий покрив; 17 АДТО (15,4%) середньоеродований ґрунтовий покрив; 7 АДТО (4,3%) сильноеродований ґрунтовий покрив; 14 АДТО (11,3%) дуже сильноеродований ґрунтовий покрив. Визначено, що в середньому на слабоеродованих ґрунтах надбій врожаю сільськогосподарських культур складає 15–20%, на середньоеродованих – 20–40% і на сильноеродованих – до 70%.

Для формування екологічно стійких агроландшафтів і зменшення ерозійно-кумулятивних процесів на території зони Степу України необхідно здійснити просторову диференціацію науково обґрунтованих систем організаційно-господарських, агротехнічних лісомеліоративних, гідротехнічних та меліоративних заходів, спрямованих на раціональне використання земельних ресурсів, збереження й підвищення родючості ґрунтів, відтворення їхньої продуктивності з метою найкращого використання всіх біологічних можливостей територіальних та аквально-екологічних екосистем.

Організаційно-господарські заходи передбачають використання зернотрав'яних сівозмін, суцільне заліснення та заростання степовими біоценозами на крутих схилах, на малопродуктивних землях відмова вирощувати просапні культури, випас худоби на сильноеродованих легких ґрунтах. Застосування агротехнічних заходів обумовлюються видом ерозійної деструкції і типом агроландшафту. Зокрема, сільськогосподарські угіддя, які зазнають водної ерозії – оранку, сівбу, культивування ґрунту проводять поперек схилу, що зменшує поверхневий стік до 4 разів і більше. Ефективним способом боротьби з водною ерозією є використання ґрунтозахисних сівозмін, смугове розміщення сільськогосподарських культур поперек схилу, залуження ґрунтів на схилах.

У районах з переважним поширенням вітрової ерозії застосовують ґрунтозахисні сівозміни, розміщують смугами посіви й пари, висівають буферні смуги

з багаторічних трав, проводять снігозатримання, безвідвальний обробіток ґрунту із залишенням стерні на поверхні, залуження еродованих земель, мульчування та поліпшення структури ґрунту. Впровадження агролісомеліоративних заходів мають важливе значення для поліпшення мікрокліматичних умов, снігозатримання та боротьби з вітровою ерозією. Система полезахисних лісових смуг захищає посіви від суховіїв і бур, поліпшує водний режим ґрунтів і запобігає ерозії. Урожайність зернових на захищених смугами полях підвищується на 2-3 ц/га. Для зменшення водно-ерозійних процесів на полях прилеглих до балок і ярів, створюють прибалкові і прияржні лісові смуги. Гідротехнічні та меліоративні заходи направлені на збалансоване зрошення в комплексі з протиерозійними насадженнями, спорудження спеціальних колекторів та протиерозійних ставів для відведення та накопичення поверхневих стоків, будівництво берегозакріплюючих конструкцій в зоні підвищеної небезпеки абразії берегів у руслах річок, дотримання меж водоохоронних зон тощо.

Головні висновки. В результаті просторового моделювання встановлено, що близько 68,7% площі ріллі постійно піддаються комплексній дії ерозійних процесів, зокрема: мінімальні та слабкі негативні прояви розповсюджені на 41,5% площі, середні – 11,6%, високі та дуже високі – 15,6% площі орних земель. Розраховано, що площа слабоеродованої ріллі складає 16,8%, середньо- та сильноеродованої – 22,1%. В результаті еродованості ґрунтового покриву відбувається перехід значних площі сільськогосподарських земель із категорії високої та середньої якості у категорію середньої, низької та дуже низької якості, що обумовлюється втратою ґрунтової родючості до 70%, зниженням урожайності та прибутку сільськогосподарських виробників, збільшенням прямих витрат в результаті використання еродованих земель і порушенням продовольчої безпеки регіонів Степу України. Для захисту ґрунтів, підвищення їх родючості та урожайності сільськогосподарських культур необхідно впровадити заходи адаптивно-ландшафтного протиерозійного проектування з елементами ґрунтозахисного землеробства, що має включати систему організаційно-господарських, агротехнічних лісомеліоративних, гідротехнічних та меліоративних заходів із урахуванням просторової диференціації якості ґрунтів та ступеню проявів водно-дефляційної ерозійної небезпеки.

Література

1. Пічур В.І., Скрипчук П.М., Дудяк Н.В. Управлінські аспекти еколого-економічних наслідків водно-ерозійної деструкції ґрунтів в зоні Степу України. *Збалансоване природокористування*. 2019. № 3. С. 109–118.
2. Dudiak N.V., Pichura V.I., Potravka L.A., Stroganov A.A. Spatial modeling of the effects of deflation destruction of the steppe soils of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21 (2). P. 166–177.
3. Pichura V.I. 2015. Basin approach to spatial-temporal modeling and neyroprediction of potassium content in dry steppe soils. *Biogeosystem Techniqu*. 2015. Vol. 2 (4). P. 172–184.

4. Тараріко О.Г., Кучма Т.Л., Ільєнко Т.В., Дем'янюк О.С. Ерозійна деградація ґрунтів України за впливу змін клімату. *Агроєкологічний журнал*. № 1. С. 7-15.
5. Наукові та прикладні основи захисту ґрунтів від ерозії в Україні: монографія. За ред. С.А. Балюка, Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО. Харків: НТУ «ХПІ», 2010. 460 с.
6. Пічуря В.І., Безніцька Н.В. Просторово-часова трансформація агрохімічного стану ґрунтів у зоні сухого степу. *Наукові доповіді НУБіП України*. № 3 (67). Режим доступу: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/8723>
7. Пічуря В.І., Потравка Л.О., Бреус Д.С., Домарацький Є.О., Карташова О.Г. Агроєкологічне обґрунтування ведення органічного землеробства в умовах півдня України: монографія. Херсон: Олді+, 2022. 222 с.
8. Lisetskii F.N., Pichura V.I., Breus D.S. Use of Geoinformation and Neurotechnology to Assess and to Forecast the Humus Content Variations in the Step Soils. *Russian Agricultural Sciences*. 2017. Vol. 2 (43). P. 151–155.
9. Dudiak N., Pichura V., Potravka L., Strachuk N. Environmental and economic effects of water and deflation destruction of steppe soil in Ukraine. *Journal of Water and Land Development*. 2021. No. 50. P. 10–26.
10. ГОСТ 17.4.4.03-86. Охрана природы. Почвы. Метод определения потенциальной опасности эрозии под воздействием дождей. Москва, 1986. 12 с.
11. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture Handbook*, (703), USDA-ARS.
12. Grushetsky A.V., Krivov V.N., Panocho N.M., Telesh P.V., Chepkov B.M., Moskalenko V.M. Album of typical solutions of marking linear boundaries in the development of intrafarm land management projects with the contour-reclamation area organization. Scientific Supervisor. Doctor of Economics L.Y. Novakovskiy. UkrNIIzemproekt, 1990. 97 p.
13. Benkobi L., Trlica M.J., Smith J.L. Evaluation of a refined surface cover subfactor for use in RUSLE. *Range Manage*. 1994. Vol. 47. P. 74–78.
14. Biesemans J., Meirvenne M.V. and Gabriels D. 2000. Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accumulation. *Soil Water Conserv*. 2000. Vol. 55. P. 35–42.
15. Van Leeuwen W.J.D., Sammons G. Vegetation dynamics and soil erosion modeling using remotely sensed data (MODIS) and GIS. *Tenth Biennial USDA Forest Service Remote Sensing Applications Conference*, 5–9 April 2004, Salt Lake City, UT. US Department of Agriculture Forest Service Remote Sensing Applications Center, Salt Lake City.
16. Ачасов А.Б., Булігін С.Ю., Можейко Т.А. та ін. Методика і нормативи обліку прояву і небезпеки ерозії (методичний посібник) / За ред. Булігін С.Ю. Харків, 2000. 64 с.
17. Можейко Г.А., Москаленко В.М., Бульгін С.Ю., Тимченко Д.О., Лавровський А.Б., Канаш А.П. Прогноз возможных потерь почвы от ветровой эрозии в степной зоне Украины. Харьков: ИПА им. А.Н. Соколовского. 1980. 83 с.
18. Булігін С.Ю. Формування екологічно сталих агроландшафтів. Київ: Урожай, 2005. 300 с.
19. Шелякин Н.М., Белолипский В.А., Головченко И.Н. Контурно-мелиоративное земледелие на склонах. Киев : Урожай, 1990. 168 с.
20. Dudiak N.V., Pichura V.I., Potravka L.A., Strachuk N.V. Geomodelling of Destruction of Soils of Ukrainian Steppe Due to Water Erosion. *Journal of Ecological Engineering*. 2019. Vol. 20 (8). P. 192–198.
21. Pichura V.I., Potravka L.A., Dudiak N.V., Skrypchuk P.M., Strachuk N.V. Retrospective and Forecast of Heterochronal Climatic Fluctuations Within Territory of Dnieper Basin. *Indian Journal of Ecology*. 2019. Vol. 46 (2). P. 402–407.
22. Shahaev V.L. Modification of soil protection technologies against wind erosion through designing thatcherizer of couch grass: Dissertation Cand. of Tech. Scien.: 05.20.01:Ulan-Ude, 2004. 159 p.
23. Luo W., Zhao W., Zhuang Y. Sand-burial and wind erosion promote oriented-growth and patchy distribution of a clonal shrub in dune ecosystems. *CATENA*. 2018. Vol. 167. P. 212–220.
24. Chi W., Zhao Y., Kuang W., He H. Impacts of anthropogenic land use/cover changes on soil wind erosion in China. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 668. P. 204-215.
25. Чорний С.Г. Причини та наслідки пилової бурі 23-24 березня 2007 року. *Регіональні проблеми України: Географічний аналіз та пошук шляхів вирішення*. Херсон. 2007. 43 с.