
МЕЛІОРАЦІЯ І РОДЮЧІСТЬ ҐРУНТІВ

МЕЛІОРАЦІЯ И ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ

MELIORATION AND SOIL FERTILITY

УДК 631.459: 504.37: 504.38

DOI <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.111.32>

ВПЛИВ ЗМІН КЛІМАТУ НА ДОЩОВУ ЕРОЗІЮ ҐРУНТІВ ТА АЛГОРИТМ ЙОГО ПРОГНОЗУВАННЯ

Зубов О.Р. – д.с.-г.н., професор, провідний науковий співробітник лабораторії лісових культур та агролісомеліорації, Український орден «Знак пошани» науково-дослідний інститут лісового господарства і агролісомеліорації імені Г.М. Висоцького

У статті показано зміни кількості атмосферних опадів, їх розподілу за місяцями теплої сезону року (квітень-жовтень) і повторюваності дощів різної висоти, що відбулися за останні 60 років на сході України. Порівняння норми опадів сучасного періоду (1991–2019 рр.) зі стандартною кліматичною нормою (1961–1990 рр.) свідчить про збільшення опадів теплої сезону на 55 мм. У травні, липні, вересні та жовтні відбулося зростання опадів на 6, 23, 17,6 та 15,1 мм відповідно; у червні та серпні опади зменшилися на 1,3 і 7,8 мм. Середньо-багаторічна сезонна кількість опадів у вигляді найбільш небезпечних дощів висотою понад 40 мм збільшилася на 33,3 мм або у 3,1 рази. Представлено емпіричні криві забезпеченості висоти дощу за сезон і кожен із місяців. Визначено, що висота опадів 10%-ї забезпеченості (вірогідності перевищення) за сезон на сході України дорівнює 57 мм. За результатами дослідів з імітацією дощів різної забезпеченості визначено залежність втрат ґрунту внаслідок міжструмкової ерозії на різних агрофонах від шару опадів за дощ. Встановлено, що найбільші втрати відбуваються на паровому полі. Визначено коефіцієнти ерозійної небезпеки колосових і просапних культур у різні фази їх розвитку та за різного обробітку ґрунту. Доведено, що внаслідок збільшення кількості опадів і збільшення повторюваності ерозійно-небезпечних дощів висотою понад 40 мм середньо-багаторічні втрати ґрунту в сучасний період зросли на 42%. Визначено, що 50% втрат ґрунту відбуваються протягом червня та липня. Внаслідок найвищої ерозійної небезпеки пару 55,5% втрат ґрунту в сівозміні формуються саме на паровому полі. Доведено, що запропонований алгоритм визначення середньо-багаторічних втрат ґрунту в сівозміні залежно від її складу дозволяє оцінювати зміну втрат ґрунту внаслідок зміни кількості опадів за теплий сезон і режиму їх випадіння у будь-якому регіоні України, а також дозволяє більш точно прогнозувати результати зміни структури сільгоспугідь, складу сівозмін і використання ґрунтозахисних агротехнічних заходів, спираючись на дані досліджень із їх ефективності.

Ключові слова: зміна клімату, атмосферні опади, моделювання опадів, стік, ерозія ґрунту.

Zubov O.R. The impact of climate change on rainfall erosion and algorithm of its forecasting

The article shows the changes in the amount of liquid precipitation, their distribution over the months of the warm season of the year (April – October) and the frequency of rains of various heights that occurred between 1961 and 2019. A comparison of the precipitation norm of the modern period (1991–2019) with the standard climatic norm (1961–1990) indicates

an increase in precipitation in rainfall-hazardous warm season by 55 mm. In May, July, September and October, precipitation increased by 6, 23, 17.6 and 15.1 mm, respectively; in June and August they decreased by 1.3 and 7.8 mm. The average annual rainfall over the season in the form of most dangerous rains with a height of more than 40 mm increased by 33.3 mm or 3.1 times. The rain height probability plot for the season and each month is presented. It is determined that the height of precipitation of 10% probability of exceedance for the season in the east of Ukraine is 57 mm. According to the results of experiments with the simulation of rains of various probability of exceedance, the dependence of soil losses as a result of interrill erosion on various agricultural backgrounds, on the precipitation layer is determined. It was determined that the largest losses occur on the fallow field. The coefficients of erosion hazard of sereal and row crops in different phases of their development and the dangers of different types of tillage are determined. It is proved that due to an increase in precipitation and an increase in the frequency of rains with a height of more than 40 mm, the average long-term soil losses in the modern period have grown by 42%. It is estimated that about 50% of soil loss occurs within June and July. Due to the high erosion hazard of fallow, 55.5% of soil losses are formed on it. It is proved that the proposed algorithm for determining the average annual loss of soil in the rotation depending on its composition allows to estimate the change in soil loss as a result of changes in rainfall height and mode during the warm season in any region of Ukraine and also allows to more accurately to predict the results of changes in farmland structure and composition crop rotation, of application of soil-protective agrotechnical measures, based on the results of studies of their effectiveness.

Key words: climate change, precipitation, rainfall simulation, runoff, soil erosion.

Постановка проблеми. Актуальним науково-практичним питанням сьогодення є оцінка впливу глобальної зміни клімату на різні галузі народного господарства. Їй присвячено вже чимало публікацій вітчизняних авторів, зокрема [1–4]. У зв'язку зі збільшенням річних атмосферних опадів постає важливе питання оцінки впливу зміни клімату на інтенсивність ерозії ґрунтів, яка є однією з головних загроз продовольчій безпеці України. Найбільше еродованих ґрунтів у державі – понад 11 млн га – налічується у степовій зоні, яка займає 18,6 млн га, або 43,6% території України [5, с. 39]. Переважаючим фактором ерозійної деградації ґрунтів тут, особливо в південній підзоні, є стік дощових вод. Найбільші втрати ґрунту від екстремальних злив, зареєстровані нами в Луганській області, яка є однією з найбільш еродованих в Україні, досягають 295 т/га [5, с. 70], що у 75 разів вище за припустимі втрати для чорноземів. Але такі зливи відбуваються рідко, тому актуальним питанням є оцінка середньо-багаторічних втрат, що відбуваються внаслідок сукупності злив різної повторюваності, й удосконалення методології їх прогнозування за зміною кліматичних умов залежно від структури угідь і складу сівозмін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш фундаментальним дослідженням клімату України та його змін з 1881 р. до середини 90-х рр. ХХ ст. є монографія УкрНДГМІ [6], заснована на матеріалі 185 метеостанцій за 30-річний період із 1 січня 1961 р. до 31 грудня 1990 р., який Всесвітня метеорологічна організація (ВМО) пропонує використовувати як *стандартний*. У монографії порівнюється *стандартна кліматична норма* метеорологічних показників із їх *кліматичною нормою* за весь період спостережень.

Зміну клімату з 1827 по 2016 рр. на сході України показано у монографії [7]; у сухостеповій підзоні за останні 70 років – у дослідженні [8].

Впливу потепління на інтенсивність ерозійної деградації ґрунтів присвячено порівняно невелику кількість публікацій, зокрема [9–13].

Постановка завдання. Мета досліджень – оцінка впливу кліматичних змін на розмір ерозійних втрат ґрунту при дощових опадах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження зміни характеристик дощових опадів виконувалися шляхом аналізу даних Луганського обласного ЦГМ (центру гідрометеорології) за 1957–2019 рр. Підраховували щомісячну

кількість діб з опадами за інтервалами їх висоти у 5 мм з 0,1 до 100 мм за період часу з квітня по жовтень, який називають вегетаційним або теплим сезоном. Помножуючи середні значення висоти (2,5; 7,5; ... 97,5 мм) на відповідну кількість дощів, визначали місячну висоту опадів і їх суму для кожного з інтервалів.

Для оцінки стокоформуєної здатності й ерозійної небезпеки різних агрофонів (під цим терміном розумітимемо сільськогосподарські культури за різними фазами їх розвитку та різні стани поверхні ґрунту) залежно від висоти дощу виконувалося фізичне моделювання рідких опадів різної забезпеченості.

Майже 30 років відділяють 2019 рік від кінця 30-річного періоду, прийнятого ВМО за стандартний, і це дозволяє повноцінно порівняти відміни норми опадів сучасного періоду від стандартної. Але спочатку покажемо відміни стандартної 30-річної норми від 100-річної кліматичної. Аналіз рис. 1.2 монографії [6, с. 22] засвідчує зростання річної норми опадів, зокрема, для метеостанції (МС) Луганськ на 21,9 мм – переважно за рахунок холодного сезону року – та неоднозначні відмінності розподілу опадів теплого сезону (табл. 1).

Таблиця 1

**Відміни внутрішньорічного розподілу опадів 1961–1990 рр.
від опадів 1891–1990 рр. (МС «Луганськ»)**

Місяці року та середні опади, мм												Сума опадів	
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	за рік	за теплий сезон
+6,8	+5,2	+2,4	+3,4	-1,4	+5,6	-0,5	-6,3	+0,6	-7,2	+4,7	+8,6	+21,9	-5,8

Дані табл. 2 свідчать про суттєві додатні, але теж неоднозначні відмінності шару опадів теплого сезону сучасного періоду відносно стандартного.

Таблиця 2

Зміни місячної та сезонної норми опадів протягом 1961–2019 рр.

Періоди	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Сезон
1961–1990	39,5	42,1	60,2	49,5	43,0	32,8	26,4	293,6
1991–2019	42,0	48,1	58,9	72,5	35,2	50,4	41,5	348,6
Збільшення	+2,5	+6	-1,3	+23	-7,8	+17,6	+15,1	+55

Оскільки місячна сума опадів неповно характеризує їх ерозійну небезпеку, визначено відмінності сучасного періоду за кількістю опадів, що випадають у середньому за рік у вигляді дощів висотою від 0–10 до 60–70 (табл. 3).

Таблиця 3

Зміна середньої річної суми опадів за інтервалами висоти дощів

Порівнювані періоди	Інтервали висоти дощів і сума опадів за ними, мм							
	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60	60–70	70–100
1961–1990	153,9	79,0	35,9	16,4	4,7	3,7	2,3	0,0
1990–2019	156,8	94,1	41,9	22,7	16,8	8,8	4,4	3,3
Збільшення опадів	+2,9	+15,1	+6,0	+6,3	+12,1	+5,1	+2,1	+3,3

Найістотніші (у рази) відмінності торкнулися опадів, що випадають у вигляді найбільш небезпечних дощів (висотою понад 40 мм) (рис. 1).

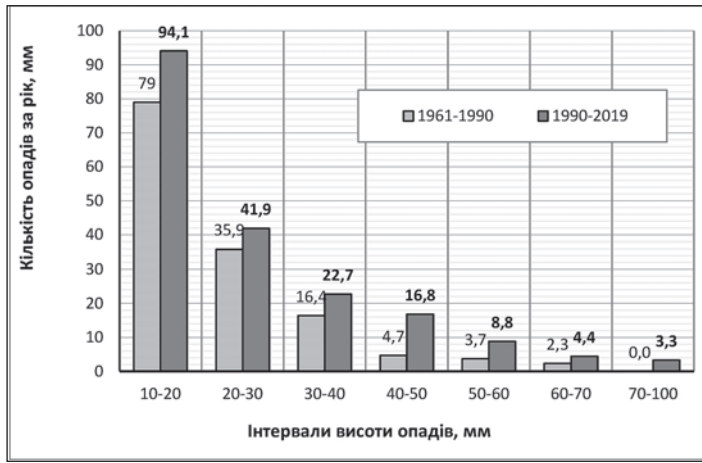


Рис. 1. Розподіл середньої сумарної сезонної кількості опадів за висотою дощів

Але й ці дані недостатні для висновку про активізацію ерозії із часом, оскільки великі опади, хоч і є більш ерозійно-небезпечними, трапляються рідше.

Для визначення повторюваності в перерахунку на 1 рік різних за висотою дощів поділено кількість днів за 1957–2019 рр. з опадами від 0,1 до 100 мм за інтервалами висоти у 10 мм на 60, тобто на тривалість періоду з урахуванням відсутніх даних за 1969, 1974 та 2014. Отримано середньо-багаторічну повторюваність кількості дощів певної висоти в перерахунку на рік для кожного місяця (табл. 4, колонки 2–9).

Таблиця 4

**Розподіл повторюваності дощів різної висоти за період 1961–2019 рр.
у перерахунку на 1 рік за місяцями**

Висота дощу X, мм	Місяці та повторюваність опадів								Вірогідність дощу P, рази за 100 років або %	Вірогідність перевищення ΣP, %
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	сезон		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0–10	7,488	7,047	7,130	6,100	4,650	5,712	6,509	44,63	4463,0	5328,3
10–20	0,738	0,967	1,197	1,133	0,766	0,661	0,563	6,025	602,5	865,3
20–30	0,115	0,181	0,442	0,267	0,267	0,204	0,136	1,610	161,0	262,8
30–40	0,033	0,082	0,115	0,150	0,100	0,068	0,034	0,582	58,2	101,8
40–50	0	0,033	0,049	0,100	0,017	0,051	0	0,250	25,0	43,6
50–60	0	0	0,034	0,050	0	0,034	0	0,118	11,8	18,6
60–70	0	0	0,017	0,035	0	0	0	0,051	5,1	6,8
70–100	0	0	0	0,017	0	0	0	0,017	1,7	1,7

Помножуючи значення річної повторюваності дощів певної висоти на 100, як показано у табл. 4 на прикладі опадів за сезон (кол. 9), визначили їх повторюваність за 100 років, кол. 10, яку можна трактувати як вірогідність випадіння дощу кожної висоти $P_{\%}$.

Як бачимо, повторюваність дощів висотою до 30 мм перевищує 100, тобто вони випадають у середньому частіше, ніж раз на рік. Дощі висотою понад 40 мм випадають у середньому рідше ніж раз на рік. Графічна інтерпретація річної повторюваності дощів висотою понад 10 мм представлена на рис. 2.

Для забезпечення можливості використання отриманих даних у комп'ютерних розрахунках виведені рівняння повторюваності опадів різної висоти (табл. 5).

Підсумовуючи значення повторюваності опадів кожної висоти за кожен місяць, помножені на 100, наростаючим підсумком, починаючи з найбільш високих (70–100 мм), як показано у табл. 4 (кол. 11) на прикладі опадів за сезон, отримали значення *вірогідності перевищення* нижньої межі кожного з інтервалів висоти дощів, або *забезпеченість опадів* певної висоти) $\Sigma P_{\%}$.

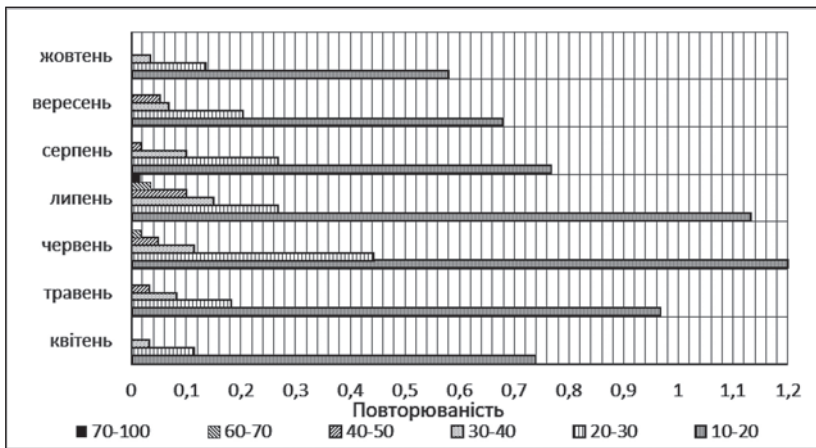


Рис. 2. Повторюваність опадів різної висоти за місяцями

Таблиця 5

Рівняння повторюваності дощів залежно від їх висоти в різні місяці

Місяць	Рівняння	R ²	Місяць	Рівняння	R ²
Квітень	$P = 117456X^{-4,712}$	0,701	Серпень	$P = 340,6X^{-2,514}$	0,866
Травень	$P = 439,44X^{-2,602}$	0,982	Вересень	$P = 104,71X^{-2,184}$	0,870
Червень	$P = 342,72X^{-2,378}$	0,965	Жовтень	$P = 1691,8X^{-3,256}$	0,894
Липень	$P = 51,09X^{-1,789}$	0,939			

За значеннями нижньої межі інтервалів висоти дощів і знайденої їх забезпеченості побудовано емпіричні криві забезпеченості для опадів за весь сезон та окремі місяці (рис. 3). Ці криві показують вірогідність перевищення фактичного шару опадів за дощ над заданим його значенням у відсотках ($P_{\%}$), або кількість років зі 100, коли опади можуть бути більшими за це значення.

Поняття забезпеченості займає важливе місце в ерозієзнавстві, адже всі методики розрахунку стоку та втрат ґрунту базуються на ньому. Представлені криві та підхід до їх побудови мають важливе теоретичне та практичне значення, оскільки дають відповідь на актуальне питання: що саме є опадами тієї чи іншої забезпеченості, адже в різних методичних рекомендаціях забезпеченість трактується по-різному.

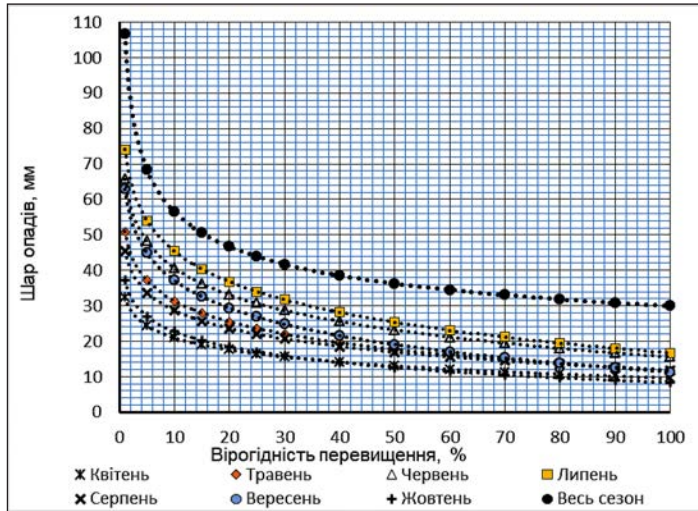


Рис. 3. Емпіричні криві забезпеченості (вірогідності перевищення) висоти дощів для місяців і теплого сезону за 1957–2019 рр.

Найбільш зрозумілим є трактування УкрНДГМІ, за яким забезпеченість певного значення висоти дощу – це кількість років зі 100, коли висота опадів за дощ може перевищити це значення [6]. Але, як буде показано далі, важливим буває знати не тільки вірогідність перевищення висоти дощу, який трапляється протягом року, але й протягом окремого місяця або сезону року.

Рис. 2 дозволяє констатувати, що опадами за дощ забезпеченістю 10% за сезон із квітня по жовтень для Луганська є 57 мм. Для окремих місяців опади такої забезпеченості мають менший шар: від 23 мм (квітень) до 45 мм (липень).

Для можливості використання отриманих даних у комп'ютерних програмах виведено рівняння забезпеченості опадів (табл. 6).

Таблиця 6

Рівняння забезпеченості (вірогідності перевищення) $P_{\%}$ опадів

Місяць	Рівняння	R^2	Місяць	Рівняння	R^2
Квітень	$P = 32,4 - 4,948\ln(X)$	0,995	Серпень	$P = 45,5 - 7,298\ln(X)$	0,992
Травень	$P = 50,9 - 8,476\ln(X)$	0,989	Вересень	$P = 62,9 - 11,2\ln(X)$	0,991
Червень	$P = 65,7 - 10,88\ln(X)$	0,996	Жовтень	$P = 37,1 - 6,247\ln(X)$	0,991
Липень	$P = 74,1 - 12,46\ln(X)$	0,983	За сезон	$P = 108,68X^{-0,276}$	0,990

Порівняння повторюваності дощів різної висоти за сучасний і стандартний 30-річний періоди (табл. 7) свідчить про збільшення повторюваності дощів усіх інтервалів висоти за сезон і майже за всі місяці, про появу злив

висотою 30–40 мм у жовтні, 40–50 мм у липні та серпні, 50–60, 60–70 мм, 70–100 мм у липні.

Таблиця 7

**Зміна повторюваності дощів різної висоти
у сучасному періоді відносно стандартного**

Висота дощу, мм	Місяці та повторюваність опадів у 1961–1990 рр. (чисельник) та у 1991–2019 рр. (знаменник)							Сумарна повторюваність
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
0–10	7,04/7,91	6,83/7,21	7,22/7,14	5,92/6,25	4,82/4,11	5,57/5,81	5,32/7,15	42,7/45,6
10–20	0,68/0,86	1,0/0,9	1,18/1,21	1,04/1,25	0,82/0,75	0,46/0,96	0,36/0,78	5,54/6,71
20–30	0,11/0,14	0,11/0,28	0,50/0,38	0,25/0,29	0,36/0,21	0,04/0,41	0,11/0,19	1,46/1,88
30–40	0,04/0,04	0,04/0,10	0,14/0,10	0,18/0,14	0,07/0,11	0,04/0,07	0/0,07	0,50/0,63
40–50	0/0	0,04/0,04	0,04/0,04	0/0,21	0/0,04	0,04/0,07	0/0	0,11/0,39
50–60		0/0	0,04/0,04	0/0,11	0/0	0,04/0,04		0,07/0,18
60–70			0/0,04	0,04/0,04		0/0		0,04/0,07
70–100			0/0	0/0,04				0/0,04

Від середньо-багаторічної повторюваності дощів певної висоти за той чи інший місяць із притаманною йому певною ерозійною небезпекою тих чи інших агрофонів залежить внесок цих опадів у середньо-багаторічні втрати ґрунту від ерозії. Знання цих втрат дає можливість виявити деградацію ґрунтів та оцінити її темп порівнянням втрат ґрунту зі швидкістю ґрунтоутворення.

Стимування середньо-багаторічних втрат у припустимих межах згідно з [14] є найбільш надійним критерієм ефективності ґрунтозахисної системи заходів.

Існують різні підходи до визначення середньо-багаторічних втрат ґрунту, зокрема ті, що приведені у [5, 14–16]. Загальним для них є визначення втрат ґрунту певної забезпеченості на найбільш уразливому фоні (зяб, пар) і перехід до середньо-багаторічного змиву в сівозміні через модульні коефіцієнти забезпеченості та коефіцієнти ерозійної стійкості окремих фонів або сівозміни загалом.

У нашій статті пропонується більш детальний алгоритм, який базується на урахуванні відмінностей у випадінні опадів за місяцями зливно-небезпечного сезону та часових змін ерозійної небезпеки різних с.-г. культур у сівозміні, опрацьований на прикладі Луганської області.

Для визначення теоретичної ерозійної небезпеки агрофонів можна користуватися будь-якою з широкого кола відомих моделей ерозії, описаних у [13; 15], але у нашому дослідженні використані власні результати дослідів із моделювання зливових опадів на різних агрофонах ланки польової сівозміни. Дослідження проведено за допомогою імітатора (патент України 62336А на винахід), розробленого в Луганському інституті агропромислового виробництва (ЛІАПВ НААН) [17]. Устрій установки описано у монографії [18, с. 132–134], де показано й інші вітчизняні та зарубіжні аналогічні пристрої. Місце моделювання – дослідне господарство ЛІАПВ «Ударник» (нині СГП ТОВ «Авіс»).

Дослідження виконувалися під керівництвом автора колективом лабораторії захисту ґрунтів від ерозії ЛІАПВ у 2003 р. у порядку виконання завдання «Опрацювати комплекси протиерозійних заходів від ерозії за ґрунтово-кліматичними зонами і землеробськими регіонами України» НТП «Родючість і охорона ґрунтів» за координацією з боку ННЦ «ІГА ім. О.Н. Соколовського».

Склад колективу виконавців польових робіт окрім автора: пров. н.с., к.с.-г.н. В.І. Тарасов, с.н.с. Ю.І. Колесніков, н.с. М.М. Полулях, інженер I категорії В.В. Михайлов, провідний агроном Л.М. Заїка.

Проведення експерименту здійснювалося за фазами розвитку культур з імітацією опадів забезпеченістю від 5 до 50%. Грунти – чорнозем звичайний слабо та середньозмитий. Для розробки режимів дощування використано розроблені в ННЦ «ІГА ім. О.Н. Соколовського» характеристики дощів різної забезпеченості [15, с. 89–97]. Для зручності штучні дощі мали ступінчатий за інтенсивністю характер (табл. 8). За кожним режимом та агрофоном дощування виконувалося у трикратній повторності. Всього протягом червня-вересня 2003 р. проведено 124 досліди. Висота дощування 2 м, діаметр крапель штучного дощу дорівнює 4,7 мм, швидкість падіння за розрахунком згідно з [18, с. 120] – 6,2 м/с, питома енергія дощу – 19,2 Дж/м² на 1 мм його висоти.

Досліджувані культури та фази їх розвитку, узагальнені умови та результати представлені у табл. 9.

Таблиця 8

Параметри злив різної забезпеченості P_% для умов Луганської області

P _%	Фаза дощу	Тривалість, хв	Шар опадів, мм	Інтенсивність, мм/хв	P _%	Фаза дощу	Тривалість, хв	Шар опадів, мм	Інтенсивність, мм/хв
5	1	15	13,4	0,89	30	1	7	3,64	0,52
	2	15	27,7	1,98		2	7	7,77	1,11
	3	15	39,0	2,53		3	8	11,7	1,46
	4	15	43,6	2,84		Разом	22	23,1	1,05
	Разом	60	123,7	2,06					
10	1	9	5,48	0,61	40	1	6	1,9	0,31
	2	9	11,2	1,24		2	7	4,7	0,68
	3	9	15,2	1,79		3	7	6,1	0,87
	4	8	18,8	2,35		Разом	20	12,7	0,64
	Разом	35	51,5	1,47					
20	1	6	3,0	0,50	50	1	6	1,7	0,28
	2	6	6,6	1,10		2	6	3,9	0,65
	3	7	9,5	1,35		3	6	4,8	0,80
	4	7	11,3	1,62		Разом	18	10,4	0,58
	Разом	26	30,4	1,17					

Таблиця 9

Умови та результати моделювання дощової ерозії

Агрофон	Фаза	I, град	ПП, %	X, мм	Y, мм	K _y	W, т/га
Озима пшениця	Сходи	1–4	4–12	13–23	0–50	0–0,40	0–16,2
	Колосіння	2,5–3,5	55–70	6–52	0–40	0–0,33	0–1,2
	Післяжнивне дискування	2–4,5	12–16	10–142	0–61	0–0,59	0–14,2
Ярий ячмінь	Колосіння	2,5–4	35–45	6–52	0–35	0–0,68	0–7,7
	Воскова стиглість	1,5–5	38–80	10–124	0–75	0,1–0,65	0,6–10,4
	Чизелювання стерні	1,5–6	3–9	30–124	0,3–46	0,01–0,42	1,8–12
Пар	Без обробітку	1,5–6	1–3	10–124	1–79	0–0,64	0,3–36
	Передпосівна культивування	1,5	1–3	10–141	0–46	0–0,44	0–13,3
Соняшник	Сходи, 6 л.	4–6	20–30	6–52	0–21,4	0–0,42	0–2,2
	Квітіння	2–5	15–90	10–124	0–35	0–0,3	0–2,2
Кукурудза	Післяжнивне дискування	3–5	4–5	10–124	0–48	0–0,39	0–11,5

Примітка: I – крутизна схилу, град; ПП – проективне покриття, %; X – шар опадів, мм; Y – шар стоку, мм; K_y – коеф. стоку; W – злив ґрунту, т/га

На кожному агрофоні визначали об'ємну масу, вологість поверхнього шару ґрунту тощо, висоту рослин і проективне покриття ними ґрунту.

На переважній кількості агрофонів стік формувався при висоті опадів понад 20 мм, і тільки на парі, ячменю у фазі колосіння та воскової стиглості – понад 10 мм. Розмір стоку та змиву залежав насамперед від шару опадів. Узагальнені за всіма дослідями залежності стоку та змиву від нього показані на рис. 4.

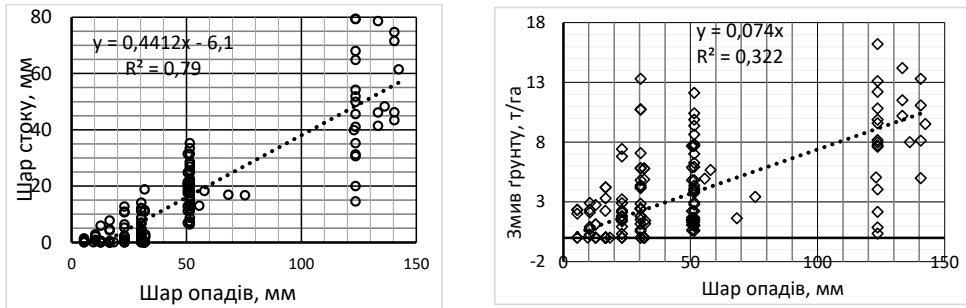


Рис. 4. Залежність стоку та змиву ґрунту за всіма експериментами від шару опадів

Виведено рівняння залежностей стоку та змиву від шару опадів (табл. 10).

За ними розраховано змив на агрофонах за різної висоти опадів X , мм (табл. 11) і сток і змив при їх забезпеченості 10% (табл. 12). Згідно з рис. 3 висота такого дощу дорівнює 57 мм.

Таблиця 10

Рівняння залежностей рідкого стоку (Y , мм) та змиву ґрунту (W , т/га) на різних агрофонах залежно від опадів за дощ (X , мм)

Агрофон		Стік		Змив	
		Рівняння	R^2	Рівняння	R^2
Озима пшениця	Сходи	$Y=0,386X - 7,6$	0,92	$W=5,112\ln X - 15,34$	0,61
	Колосіння	$Y=0,528X - 10,5$	0,64	$W=0,0364X - 0,716$	0,71
	П/ж дискування	$Y=0,6154X - 12,0$	0,90	$W=0,0912X - 0,550$	0,83
Ячмінь	Колосіння	$Y=0,4764X - 4,1$	0,72	$W=0,1139X - 0,193$	0,47
	Воскова стиглість	$Y=0,560X - 3,7$	0,97	$W=0,268X - 0,0015X^2 - 1,47$	0,74
	Чизелювання стерні	$Y=0,407X - 7,7$	0,91	$W=0,1685X - 0,0008X^2 - 1,39$	0,37
Соняшник	Сходи	$Y=0,4556X - 9,4$	0,74	$W=0,0479x - 0,982$	0,74
	Квітіння	$Y=14,52\ln X - 45,9$	0,69	$W=0,70\ln X - 2,085$	0,43
Кукурудза	П/ж дискування	$Y=0,392X - 8,1$	0,99	$W=3,799\ln X - 9,568$	0,74
Пар	Без обробітку	$Y=0,4574X - 5,4$	0,86	$W=0,887X - 0,0058X^2 - 9,93$	0,66
	Після культивуваці	$Y=0,373X - 6,2$	0,99	$W=0,0805X + 0,402$	0,83

Розділивши діапазон варіювання стоку (табл. 12) на 5 інтервалів: 12–15, 15–18, 18–22, 22–26, 26–30 мм, проранжували агрофони за стокоформуючою здатністю (ранги 1–5). Те ж саме виконано для змиву, розділивши його на інтервали 0–2, 2–5, 5–10, 10–15, 15–20 т/га (табл. 12).

Таблиця 11

Теоретичний змив ґрунту на агрофонах (т/га) залежно від висоти дощу

Х, мм	Озима пшениця			Ячмінь			Соняшник		Кукур.	Пар	
	сходи	колосіння	дискування	колосіння	воск. стигл.	чизел. стерні	сходи	квітіння	п/ж диск.	необробл.	після культ.
15	0,00	0,00	0,00	1,52	2,21	0,00	0,00	0,00	0,00	2,28	1,61
25	1,11	0,19	1,73	2,66	4,29	1,55	0,22	0,17	2,66	6,99	2,41
35	2,83	0,56	2,64	3,79	6,07	4,75	0,69	0,40	3,94	10,90	3,22
45	4,12	0,92	3,55	4,93	7,55	7,37	1,17	0,58	4,90	14,01	4,02
55	5,14	1,29	4,47	6,07	8,73	9,41	1,65	0,72	5,66	16,32	4,83
65	6,00	1,65	5,38	7,21	9,61	10,87	2,13	0,84	6,29	17,83	5,63
85	7,37	2,38	7,20	9,49	10,47	12,05	3,09	1,02	7,31	18,45	7,24

Таблиця 12

Стокоформуюча здатність агрофонів і їх ерозійна небезпечність

Агрофон		Шар стоку У, мм	Коеф. стоку K _y	Ранг	Змив ґрунту W, т/га	Коефіцієнт ерозійної небезпеки K _{ер}	Ранг за змивом
Озима пшениця	Сходи	14,4	0,25	1	5,33	0,34	3
	Колосіння	19,6	0,34	3	1,36	0,09	1
	Дискування	23,1	0,40	4	4,65	0,30	2
Ячмінь	Колосіння	23,1	0,40	4	6,30	0,40	3
	Воск. стиглість	28,2	0,50	5	15,27	0,98	5
	Чизелювання	15,5	0,27	2	5,62	0,36	3
Соняшник	Сходи	16,6	0,29	2	1,75	0,11	1
	Квітіння	12,8	0,22	1	0,75	0,05	1
Кукурудза	П/ж дискування	14,2	0,25	1	5,80	0,37	3
Пар	Без обробітку	20,7	0,36	3	16,69	1	5
	П/п культивація	15,1	0,26	2	4,99	0,32	2

Дослідження показали, що найбільший змив при зливах 10% забезпеченості відбувається на пару та при воскової стиглості ячменю. Але якщо змив на ячменю є наслідком підвищеної стокоформуючої здатності цього агрофону, то на пару великий змив зумовлений його найнижчою протиерозійною стійкістю. За відношенням змиву на інших агрофонах до змиву на пару отримано коефіцієнти їх ерозійної небезпеки.

Виходячи з сівозміни, складеної за дослідженими культурами (озима пшениця – кукурудза – ячмінь – соняшник – пар) і чергування за часом фаз їх розвитку та стану ґрунту, підміняючи фактичні фази наявними з досліджених, отримано матрицю повторюваності досліджених агрофонів за місяцями (табл. 13).

Таблиця 13

Частка досліджуваних агрофонів у сівзміні

Агрофон	Місяці сезону						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Сходи зернових колосових	0,4	-	-	-	-	-	0,2
Озима пшениця у фазі колосіння	-	0,2	0,2	-	-	-	-
Ячмінь у фазі колосіння		0,2	0,2				
Колосові у фазі воскової стиглості				0,4	-	-	-
Стерня колосових після дискування	-	-	-	-	0,4	-	-
Стерня колосових після чизелювання	-	-	-	-	-	0,4	0,4
Сходи просапних		0,4	0,4	-	-	-	-
Посапні у фазі цвітіння	-	-	-	0,4	0,4	0,4	-
Стерня просапних після дискування	-	-	-	-	-	-	0,4
Пар без обробітку протягом вегетації	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	-	-
Пар після передпосівної культивуації	-	-	-	-	-	0,2	-
Сумарна доля агрофонів у сівзміні	1	1	1	1	1	1	1

За допомогою програми Excel дані з повторюваності агрофонів за кожен місяць з табл. 13 помножувалися на значення змиву ґрунту з агрофонів при кожній висоті дощів з табл. 11 та на повторюваність опадів кожного інтервалу висоти дощів за відповідний місяць з табл. 7. Результати підсумовувалися за окремими місяцями, інтервалами висоти дощів, агрофонами.

Отримано середньобогаторічний змив у сівзміні за стандартний і сучасний періоди: 10,15 т/га та 14,44 т/га. Отже, зміна висоти та режиму опадів збільшили втрати ґрунту в 1,42 рази. Розподіл частки втрат ґрунту за місяцями теплого сезону у відсотках від загального змиву та в т/га (рис. 5) свідчить, що найбільша частка змиву у 1961–1990 рр. (27,1%) була в червні, а в 1991–2019 рр. у липні (30,8%). В обидва порівнювані періоди за ці два місяці відбувається 50% втрат ґрунту за сезон. На третьому місці за втратами ґрунту (16,8 і 15%) стоїть квітень, незважаючи на те, що в цьому місяці висота дощів не перевищує 40 мм. Відносно великі втрати є наслідком найменшої захищеності ґрунту с.-г. рослинністю. Найменша частка втрат ґрунту (до 4%) припадала на жовтень.

Розподіл втрат ґрунту за інтервалами висоти дощів та інтегральна крива розподілу (рис. 6) свідчать, що 95% річного змиву від дощів у 1961–1990 рр. відбувалися при їх висоті до 40 мм, а в 1991–2019 рр. – при висоті до 55 мм.

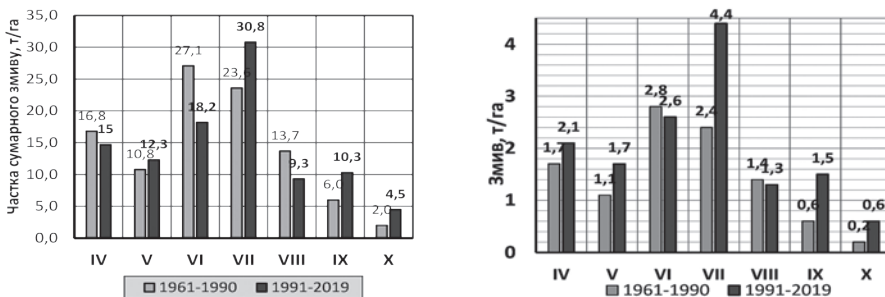


Рис. 5. Розподіл частки змиву за місяцями теплого сезону стандартного та сучасного періодів: а) у відсотках; б) у т/га

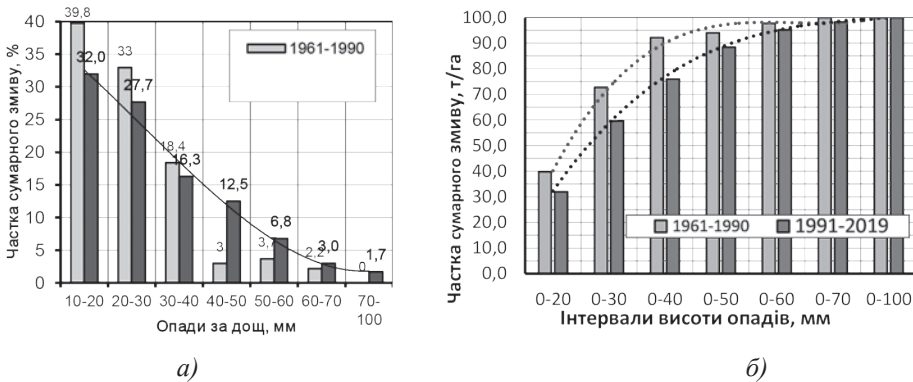


Рис. 6. Розподіл частки сезонного змиву у відсотках за інтервалами опадів (а); їх частка зростаючим підсумком та інтегральна крива розподілу (б)

Аналіз змиву за агрофонами свідчить, що в середньому за двома періодами 55,5% втрат ґрунту відбувається на паровому полі через найвищу ерозійну небезпеку цього агрофону. З цього випливає висновок про важливість зайнятих парів і ґрунтозахисного обробітку парів. Як показали дослідження [5, с. 70], навіть такий простий фактор, як поперечний напрямок боронування сходів, здатний понизити втрати ґрунту на просапних при опадах 115 мм у 5 разів.

Ділячи сумарний змив у відсотках (100%) на кількість інтервалів опадів по 10 мм (їх 9), визначили, що середній змив за ними дорівнює 11,1%. За лінією тренду на рис. 6 а визначили, що такий відсоток має місце при висоті дощу 47 мм. За рис. 3 ця висота має сезонну забезпеченість 20%. Отже, втратам ґрунту при такій забезпеченості опадів відповідає середньобагаторічний змив у цій сівозміні.

Таким чином, аналіз результатів моделювання дощів різної забезпеченості показав, що при визначенні середньобагаторічних втрат ґрунту методом штучного дощування можна обмежуватися імітацією опадів до 50 мм. Найпростішим варіантом досліджень для визначення середньобагаторічних втрат є моделювання опадів 20%-ї забезпеченості, яка в умовах сходу України дорівнює 47 мм. В інших регіонах вона може бути визначеною за представленою методикою обробки метеорологічних даних обласних ЦГМ з добових опадів.

Об'єктивно оцінюючи отримані дані зі змиву ґрунту, слід відзначити, що хоча вони були достатні для вирішення поставлених задач, вони мають відносний, порівняльний характер. Адже в подібних дослідях, навіть коли площа дощування досягає кількох квадратних метрів, оцінюється лише одна з трьох складових частин ерозійного процесу, а саме міжструмкова ерозія (*interrill erosion*). Але, як відомо, окрім неї, на схилі землях існує більш помітна струмкова ерозія (*rill erosion*) та ерозія дна улоговин (*ephemeral gully erosion*) [15, с. 83; 18, с. 8–9].

Дослідження міжструмкової ерозії є важливим етапом визначення ерозійної сталості ґрунту на базі технології моделі водної ерозії WEPP згідно з методикою ННЦ «ІГА ім. О.Н. Соколовського» [15, с. 87–88]. За даними зі стоку та змиву ґрунту, отримуваними за допомогою установки конструкції ЛПАПВ, можна визначити, на наш погляд, *початкову каламутність* або *ерозійний коефіцієнт* γ – важливий параметр моделі ерозії ВНДІЗІЗПЕ [14], відомої згідно з [13] ще як «формула змиву Г.П. Сурмача». Звичайно γ визначають із таблиці [14, с. 100].

Таким чином, отримані значення змиву можна розцінювати як мінімальний рівень втрат ґрунту на досліджуваному науково-виробничому об'єкті. Отримані значення стоку за різної забезпеченості дощів, навпаки, є їх найвищим можливим рівнем, від якого залежить інтенсивність струмкової та улоговинної ерозії. Отже, дані зі стокоформуючої здатності агрофонів при дощах різної забезпеченості, отримувані за допомогою використаної установки, можна використовувати при проектуванні протиерозійних гідротехнічних і лісомеліоративних заходів.

За допомогою установки можна вивчати залежність стоку від водно-фізичних властивостей ґрунту, швидкість усотування вологи опадів залежно від їх висоти та інтенсивності, порівнювати протиерозійну стійкість агрофонів.

Висновки і пропозиції. Наслідками глобального потепління за останні 30 років в умовах сходу України є збільшення шару опадів за вегетаційний період року на 55 мм, збільшення втричі частки найбільш ерозійно-небезпечних дощів висотою понад 40 мм, прояв дощів, що перевищують 65 мм за добу. Результатом означених змін є теоретичне збільшення середніх втрат ґрунту на 42%.

Запропонований алгоритм визначення середньо-багаторічного змиву ґрунту в сівозміні, заснований, по-перше, на врахуванні зміни висоти дощів та їх повторюваності за місяцями; по-друге, на більш детальному врахуванні зміни в часі ерозійної небезпеки агрофонів, дозволяє точніше оцінювати наслідки зміни висоти та характеру опадів, прогнозувати вплив зміни складу сівозмін і використання агротехнологій на захищеність ґрунту від ерозійної деградації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Балюк С.А., Воротинцева Л.І., Захарова М.А., Дрозд О.М., Носоненко О.А. Охорона та відтворення ресурсного потенціалу ґрунтів в умовах змін клімату. *Вісник аграрної науки*. 2017. № 12. С. 10–13.
2. Букша Й.Ф. Изменение климата и лесное хозяйство Украины. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. Львів : РВВ НЛТУ України, 2009. Вип. 7. С. 11–17.
3. Хром'як В.М., Наливайко В.В. Ризики ведення рослинництва в умовах Північно-східного Степу в зв'язку зі зміною клімату. *Вісник аграрної науки*, 2016. № 9. С. 17–24.
4. Оцінка вразливості до зміни клімату: Україна / О. Шевченко та ін. Київ: Myflaer, 2014. 74 с. URL: http://necu.org.ua/wp-content/uploads/ukraine_cc_vulnerability.pdf.
5. Зубов А.Р., Зыков И.Г., Тарарико А.Г. Формирование эрозионно-устойчивых агроландшафтов в бассейне Северского Донца : монография. Волгоград : ГНУ ВНИАЛМИ, 2010. 240 с.
6. Клімат України / за ред. В.М. Липинського, В.А. Дячука, В.М. Бабиченко. Киев : Видавництво Раєвського, 2003. 343 с.
7. Зубов А.Р., Зубова Л.Г. Климат Луганска и его прикладные аспекты : монография. Луганск. Изд-во «Ноулидж», 2016. 180 с.
8. Безніцька Н.В. Формування показників родючості і продуктивності меліорованих ґрунтів в умовах регіональних змін клімату (на прикладі Херсонської області) : дис. ... канд. с.-г. наук. Херсон, 2017. 186 с.
9. Nearing M.A. et al. (2005). Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*, 61, 131–154. URL: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.03.007>.
10. Тараріко О.Г. та ін. Ерозійна деградація ґрунтів України за впливу змін клімату. *Агроекологічний журнал*. 2017. Вип. 1. С. 7–15.
11. Чорний С.Г. Вплив змін клімату півдня України на ерозію ґрунтів. *Генеza, географія та екологія ґрунтів : праці міжнар. наук. конф.* Львів, 2003. С. 432–436.

12. Будник С.В. Ливневый сток со склонов : монография. Житомир, 2007. 184 с.
 13. Светличный А.А., Черный С.Г., Швецс Г.И. Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты : монография. Сумы : Университетская книга, 2004. 410 с.
 14. Сурмач Г.П. Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противоэрозионные мероприятия. Волгоград, 1992. 175 с.
 15. Булигін С.Ю., Думін Ю.В., Купенко М.В. Оцінка географічного середовища та оптимізація землекористування. Харків: Тов. «Світло зі сходу», 2002. 168 с.
 16. Нормативи ґрунтозахисних контурно-меліоративних систем землеробства / за ред. О.Г. Тараріко і М.Г. Лобаса. Київ : Інститут агроекології та біотехнології УААН, Аграрний інститут НБАТ Агроінком, 1998. 158 с.
 17. Дощувальна установка для вивчення ерозії ґрунтів : пат. 62336 А, Україна, МПК (2006) А01В 13/16, А01G 25/00 / В.І. Тарасов, О.Р. Зубов, Колесніков Ю.І., М.М. Полулях ; заявл. 06.03.2003 ; опубл. 15.12.2003. Бюл. № 12, 4 с.
 18. Кулик К.Н., Зубов А.Р., Зыков И.Г., Зубов А.А. Методология изучения эрозийных процессов в лесоаграрных и техногенных ландшафтах ФНЦ агроэкологии РАН. Волгоград, 2018. 252 с. URL: <http://www.geokniga.org/books/20732>.
 19. Зубов О.Р., Зубов А.О. Зв'язок властивостей ґрунтів з їх еродованістю. *Агроекологічний журнал*, 2019. Вип. 3. С. 42–52.
-