

состоялось «перераспределение» объемов воды атмосферных осадков в сторону суммарного испарения с уменьшением объемов воды, идущих на формирование стока воды.

Ключевые слова: речной бассейн, составляющие водного баланса, многолетние изменения, коэффициент стока, коэффициент засушливости, р. Псел.

Time dynamics of water balance components in the Psel river basin

Lukianets O.I., Grebin V.V.

In the article, in order to identify the generalized role of changes that occurred in the Psel River basin with such climatic indicators as air temperature, amount of precipitation, their form of precipitation, the structure of water bodies feeding, as well as water flow in the modern period, the average water balance for a long-term period was calculated the Psel river basin near the town of Gadyach. In general, the water balance equation shows the ratio of water input and consumption within a river basin, taking into account changes in its reserves over a selected time interval and allows one to assess the relationship of its individual components. In the article identifies changes in the ratio between the inflow (amount of precipitation) and consumption of water (total evaporation and runoff) for two periods - the climatic norm of 1961-1990 and modern 1990-2019.

Analysis of the temporal dynamics of the water balance components of the Psel river basin showed that the values of the water balance components within the Psel river basin near the town of Gadyach in the modern period have decreased in comparison with the period of the climatic norm - the amount of precipitation by 6,2%, water flow by 17,5%, evapotranspiration by 1,8%. But, analyzing the relationship between the inflow and outflow of water in the basin for the two study periods 1961-1990 and 1990-2019, it can be stated that during the period of the climatic norm, the percentage of water flow from the total precipitation was greater (coefficient water flow 16.2%) than in the modern period (coefficient water flow 14.2%). With regard to total evaporation in water-balance ratios, its share in the water-balance ratio has increased over the modern period (1990-2019). If during the period of climatic normal (1961-1990) the aridity coefficient was 83.8%, then in the modern period, it is 85.8%. That is, the "redistribution" of the water volumes of atmospheric precipitation took place towards the total evaporation with a decrease in the volume of water used to form the water runoff. For the basin of the river Psel - the city of Gadyach in the modern period on the average ≈ 11 mm (or ≈ 130000000 m³) evaporate instead of replenishment of water resources. In the previous period of 1961-1990, on the contrary, ≈ 12 mm (or 136000000 m³) did not evaporate, but flowed into the water bodies of the basin.

Keywords: river basin, water balance components, long-term changes, runoff coefficient, aridity coefficient, Psel River.

Надійшла до редколегії 24.10.2020

DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.4>

УДК 551.577.21; 551.577.53

Сокур К.С., Паламарчук Л.В.

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС та НАН України, Київ

УМОВИ ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ В МЕЖАХ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ ПРИ ВИПАДАННІ ДУЖЕ СИЛЬНИХ ТА НЕБЕЗПЕЧНИХ ОПАДІВ

У роботі досліджуються атмосферні опади, що за своїми показниками досягли критеріїв дуже сильних (≥ 50 мм за ≤ 12 год) та небезпечних (15-49 мм за ≤ 12 год). Проаналізовано 98 випадків дуже сильних опадів, що спостерігались протягом 2005-2018 рр., та 14 випадків небезпечних опадів, що спостерігались протягом 2017-2018рр. Основна увага приділяється умовам формування та об'ємам поверхневого стоку, що утворюється на різних типах підстильної поверхні.

Для отримання статистично об'єднаної класифікації проведено кластерний аналіз даних дуже сильних та небезпечних опадів.

Досліджувалась ступінь залежності інтенсивності дуже сильних опадів від вертикального розвитку хмарності, тривалості процесу та кількості опадів, що випала. Розглянуто механізми та фізичні особливості процесів хмаро- та опадоутворення, що формують такі залежності. Відмічається виключна роль конвективних хмар як в окремих фронтальних масивах так і у вигляді «затопленої конвекції» у масивах шарувато-дощових хмар у формуванні значних об'ємів дощової води на підстильній поверхні.

Оцінено часові змін інтенсивності опадів для окремих процесів, що спостерігались протягом 2017-2018 рр. та встановлено структуру таких змін: визначено максимальні інтенсивності опадів, час їх настання, наявність та кількість хвиль підсилення та їх часові параметри. На основі отриманих показників розраховано масу дощової води та інтенсивність опадів за об'ємом води для хвиль підсилення. Визначалися величини поверхневого стоку для процесу в цілому та для хвиль підсилення зокрема. В результаті отримано, що величини поверхневого стоку, сформованого а забудованій території, де переважає частка водонепроникних покриттів, на 100-300% перевищують поверхневий стік зі слабо забудованої території, на якій майже відсутні штучні покриття.

Ключові слова: небезпечні та дуже сильні опади, урбанізація, кластерний аналіз, r-Спірмена, t-Кендалла, поверхневий стік.

Вступ. В останні десятиріччя у природному середовищі домінують процеси змін клімату, а у соціальному – процеси урбанізації. Урбанізовані ландшафти, що виникають в містах та набувають нових властивостей у порівнянні з природними, справляють значний вплив на перебіг метеорологічних процесів і явищ мезомасштабного рівня. Основні напрямки цього впливу: зміна термічного режиму приземного шару атмосфери, особлива динаміка повітряних потоків у граничному шарі атмосфери, в т.ч. і вертикальних рухів, зміна хімічного складу атмосферного повітря за рахунок різноманітних антропогенних викидів. З точки зору процесів хмаро- та опадоутворення, в межах великих міст та міських агломерацій складаються сприятливі умови для збільшення опадів, особливо фронтальних злив, завдяки підвищеним концентраціям ядер конденсації, часто активних при відносно низьких значеннях вологості, а також внаслідок інтенсифікації висхідних рухів. Якщо врахувати результати досліджень, наприклад, Балабух (Balabukh, 2008), які показують, що в Україні за останні десятиріччя відмічається збільшення кількості випадків опадів, що досягли критеріїв небезпечних та стихійних, то у межах великих міст такі випадки будуть мати ще більш високу інтенсивність і формуватимуть значний поверхневий стік. У зв'язку з цим виникає необхідність досліджувати та враховувати зміни опадоутворення, об'єми поверхневого стоку та їх вплив на функціонування міських територій у планах розвитку та забудови міст.

Останні тенденції розвитку великого міста у економічно розвинених країнах висвітлюються у програмах розвитку, створенні так званих “розумних міст”, міст-інновацій. Формування таких програм і технологій потребує і врахування оцінок можливих природних небезпек та загроз, серед яких і несприятливі метеорологічні процеси та явища. Незважаючи на те, що в 2015 році в м. Київ запропоновано Концепцію Kyiv Smart City, було б помилково стверджувати, що якість життя мешканців міста за рахунок її реалізації помітно зросла. Серед низки інших проблем саме в останні роки в Києві та інших великих містах України, таких як, наприклад, Одеса, Львів особливо помітно збільшилась кількість випадків затоплень під час злив. Це спричинено в першу чергу, прискоренням темпу росту міста, його точковою забудовою, перевиконанням Генерального плану щодо збільшення частки багатоповерхових житлових будинків, та його катастрофічним недовиконанням стосовно міської інфраструктури, збільшення частки водонепроникних, асфальтних покриттів та доріг, що супроводжується скороченням частки Зеленої зони, недосконалістю дощової системи водовідведення. Найбільш небезпечні наслідки спричиняють саме інтенсивні опади, коли за короткий проміжок часу на земній поверхні формуються значні об'єми поверхневого стоку. У зв'язку з цим виникає потреба у вивченні тенденцій та змін основних параметрів дуже сильних та небезпечних опадів, визначенні ступеню зв'язку інтенсивності дуже сильних опадів з іншими параметрами процесу опадоутворення та впливу типу підстильної поверхні на величину поверхневого стоку.

Дослідження дуже сильних опадів є актуальною і важливою задачею також і у зв'язку з отриманими у ряді наукових досліджень даними про зростання впливу на процеси опадоутворення сучасного глобального потепління через загострення температурних контрастів та загальне збільшення повторюваності і кількості екстремумів метеорологічних величин. Так, Nikolina Ban (2018), Christoph Schär (2017) за результатами чисельного моделювання вказали на тенденцію до збільшення числа випадків дуже сильних опадів в найближчому майбутньому, спираючись на загальновідомий факт, що кількість випадків екстремальних опадів буде збільшуватись зі швидкістю близько 6-7% на градус збільшення середньої температури відповідно до закону Клаузіуса-Клапейрона.

В роботах Papalexiou (2019) зазначається, що завдяки аналізу розрахунків глобальних кліматичних моделей передбачається збільшення опадів на 2% / на 1 °C збільшення приземної температури повітря. Проте, такі зміни залежать багато в чому від регіональних особливостей клімату. Дослідження проведені Pendergrass (2014) також підтвердили той факт, що з потеплінням атмосфери, інтенсивності опадів збільшуються. Також авторами було встановлено закономірності зміни кількості опадів та розподілу частоти випадків опадів певної інтенсивності залежно від збільшення рівня CO₂ в атмосфері. Такі оцінки проводилися з використанням моделей CMIP5.

Mitchell (1995), Chen (2011) притримуються думки про необхідність додаткового та більш детального вивчення впливу на атмосферні процеси і інших антропогенних чинників,

ISSN:2306-5680 Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2021. № 1 (59)

наприклад, аерозолів антропогенного походження, значні концентрації яких є у повітрі над великими містами. Ці складові повітря можуть суттєво впливати на зміну характеристик процесів опадоутворення через складну взаємодію комплексу аерозоль-хмара-клімат. Автори вважають, що аерозольні частки охолоджують земну поверхню, компенсуючи ефект потепління, спричинений парниковими газами, змінюють термічний режим, впливають на випаровування і вміст вологи в атмосфері.

Питання впливу дуже сильних та небезпечних опадів на величину поверхневого стоку у межах урбанізованих територій розкриті у роботах Itsukushima (2018), Wang (2020), Ruczko (2020), де також представлені методи регулювання поверхневого стоку, проводиться оцінка впливу дуже сильних опадів на стан асфальтного покриття, системи водовідведення та річкові басейни і гідроморфологію великих міст. Авторами досліджуються зміни характеристик стоку в залежності від можливого сценарію урбанізації.

Метою цієї роботи є дослідження динаміки окремого процесу опадів, що своїми параметрами перевищує критерії, встановлені для небезпечних та стихійних явищ; проведення статистично обґрунтованої класифікації таких випадків, встановлення зв'язку між окремими параметрами процесу опадоутворення та визначення впливу забудованості території великих міст на величину поверхневого стоку.

Матеріали та методи дослідження. У роботі використовувалися дані спостережень гідрометеорологічної мережі за період 2005-2018 рр. Джерелами початкових даних були таблиці ТМ-1, метеорологічні щомісячники, дані півніографа, дані супутникових спостережень (EUMETSAT DATA CENTRE). Зміни інтенсивності опадів в межах кожного окремого процесу досліджувались на основі побудованих півніограм.

Відмінності синоптичних умов, фізичних процесів утворення опадів і їх випадання потребують проведення статистично обґрунтованої класифікації випадків дуже сильних та небезпечних опадів з подальшою можливістю її використання для прогнозування кількості опадів, режиму їх випадання та величини поверхневого стоку.

Для проведення класифікації проводився кластерний аналіз отриманої вибірки на основі обраних параметрів. Реалізовувався аналіз у програмі STATISTICA. Кластерний аналіз (вперше термін введений Tryon, 1939) включає в себе набір різноманітних алгоритмів класифікації, тобто розподілу об'єктів на кластери, і є інструментом організації даних в наглядні структури. Об'єднання об'єктів у кластери (деревоподібна кластеризація) відбувається шляхом оцінки міри подібності або відстані між ними. Типовим результатом такої кластеризації є ієрархічне дерево. Існує декілька методів визначення міри відстані між об'єктами: евклідова відстань (Euclidian distances), квадрат евклідової відстані (squared Euclidian distances), відстань міських кварталів або Манхеттенівська відстань (city-block (Manhattan) distances), відстань Чебишева (Chebychev distance metric), відсоток невідповідності (percent disagreement), степенева відстань. Коли між собою об'єднуються декілька об'єктів, відстань між кластерами можна знайти за допомогою «правила найближчого сусіда» або методу одиничного зв'язку. В якості альтернативи можна використати сусідів в кластерах, які знаходяться далі за всі інші пари об'єктів один від одного. Це метод повного зв'язку [14].

В роботі, розрахунок відстані між кластерами проводився методом повного зв'язку, в якості міри близькості використовували евклідову відстань. Міра близькості, що визначається евклідовою відстанню, є геометричною відстанню в n -мірному просторі і розраховується наступним чином:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}. \quad (1)$$

Після формування гіпотези відносно числа кластерів, для подальших досліджень використовується метод К-середніх. З розрахункової точки зору такий метод можна розглядати як дисперсний аналіз «навпаки». Програма починає з K випадково вибраних кластерів, а потім змінює приналежність об'єктів до них для того, щоб: мінімізувати мінливість в середині кластерів; мінімізувати мінливість між кластерами. Даний спосіб є аналогічним методу дисперсного аналізу «навпаки» в тому сенсі, що критерій значимості в дисперсному аналізі порівнює міжгрупову мінливість з внутрішньогруповою при перевірці гіпотези про те, чи середні відрізняються один від одного. В кластеризації методом К-

середніх програма переміщує об'єкти з одних кластерів в інші для отримання найбільш значимого результату. Після отримання результатів методом К-середніх, розраховуються середні значення для кожного кластеру по кожному вимірюванню для оцінки різниці значень величин між кластерами. Такі середні для більшості випадків, якщо не для всіх вимірювань, повинні сильно різнитися. Значення F-статистики, отримані для кожного вимірювання, є другим індикатором того, на скільки добре відповідне вимірювання дискримінує кластери [14].

Для визначення ступеню впливу параметрів процесу опадоутворення на інтенсивність опадів визначалися коефіцієнти кореляції. Для проведення кореляційного аналізу даних було задіяно модуль “Статистика”, а також “Непараметрична статистика” програми STATISTICA. В роботі використовувалась як статистика г-Пірсона, так і статистики г-Спірмена та т-Кендалла. Коефіцієнт кореляції Пірсона вимірює ступінь лінійного зв'язку між кількісними ознаками, його застосування є обґрунтованим у тому випадку, коли розподіл генеральної сукупності, яку представляє вибірка є нормальним. Статистика г-Спірмена може розглядатися як прямий аналог статистики г-Пірсона, вирахований по рангам, в основі статистики т-Кендалла лежить ймовірність. Непараметричні коефіцієнти кореляції використовуються тоді, коли змінні є кількісними, закон розподілу невідомий або не є нормальним. І, додаткова умова – коефіцієнти Спірмена та Кендалла застосовують, якщо вибірка має невеликий об'єм. Однією з необхідних умов отримання більш точного результату є взаємозалежність параметрів з яких складається вибірка.

Розрахунок поверхневого стоку в межах великих міст проводився за допомогою методу порядкових кривих, який був розроблений Службою охорони ґрунтів Департаменту сільського господарства США (SCS USDA).

В основу цього методу покладено таке припущення:

$$\frac{H_{\text{ст}}}{H_{\text{надл}}} = \frac{H_{\text{надл}}}{(H_{\text{надл}} + H_{\text{нас}})}, \quad (2)$$

де $H_{\text{ст}}$ - висота шару стоку, що потрапляє у водовідвідну мережу; $H_{\text{ст}} = W_{\text{ст}}/F$; $H_{\text{нас}}$ - висота шару насичення, що характеризує максимальні інфільтраційні можливості басейну стоку; $H_{\text{надл}} = H - H_o$ - висота надлишкового шару опадів, що визначається як висота шару опадів та шару початкового затримання H_o .

Згідно з великою кількістю проаналізованих експериментальних результатів та нормативного документа [15] для умов щільної міської забудови висоту насичення ($H_{\text{нас}}$) слід приймати 5,2 мм, а висоту шару початкового затримання - H_o - 1,04 мм.

Тоді середній коефіцієнт стоку визначається таким чином:

$$\psi_{\text{mid}} = \frac{H_{\text{ст}}}{H} = \frac{(1 - 0,2H_{\text{нас}}/H)^2}{1 + 0,8H_{\text{нас}}/H}. \quad (3)$$

Але коефіцієнт стоку, розрахований за такою методикою для кожного конкретного випадку, має менші значення ніж величина єдиного нормативного значення $\psi_{\text{mid}} = 0,95$ за вітчизняними методиками [4,15].

Обговорення результатів дослідження. Аналіз синоптичних матеріалів [5] показав, що у більшості випадків причиною формування дуже сильних та небезпечних опадів над територією України є стаціонування блокуючого антициклону на сході, північному сході від території України або просторове зближення двох основних фронтів – арктичного та полярного. Такого типу опади на мезомасштабному рівні пов'язані з хмарними системами теплих хвиль основних фронтів, частини фронту оклюзії близької до центру циклону, точки оклюзії циклону.

За період 2005-2018 рр. спостерігалось 98 випадків дуже сильних опадів (50 мм і більше за 12 год і менше), найбільша їх кількість відмічалась у 2010 р. (12 випадків), 2012, 2013 рр. (по 11 випадків), 2007, 2008 рр. (10 випадків); найменша – у 2005, 2015 рр., у 2017 р. не зафіксовано жодного випадку, що підпадав би під критерії дуже сильних опадів.

Крім дослідження випадків дуже сильних опадів, для детального вивчення часової структури інтенсивності опадів в роботі було проаналізовано 14 випадків небезпечних опадів (15-49 мм за 12 год і менше), зафіксованих на метеостанції Київ протягом 2017-2018 рр.

Кластерний аналіз випадків дуже сильних та небезпечних опадів. Очевидно, що найбільші об'єми поверхневого стоку можна очікувати при випаданні дуже сильних та небезпечних опадів. Уточненню прогнозів таких ситуацій може сприяти статистично обґрунтована їх класифікація. Існує декілька підходів до класифікації опадів, що відрізняються критеріями та призначенням.

В роботі авторів [5] наведено аналітичну типізацію процесів випадіння дуже сильних опадів теплого періоду на рівнинній території України. При збереженні класичних назв типів опадів в ній застосовувалися нові критерії поділу: значення середньої максимальної інтенсивності, наявність та кількість смуг підсилення опадів у часовому ході, характер початку випадання опадів. Такий підхід дозволив виділити три основні типи опадів: зливові, тип "мікс" облогові з включенням зливових та власне облогові опади. Використовуючи запропонований підхід і доповнивши його новими критеріями, у представленому дослідженні проведено кластерний аналіз випадків дуже сильних та небезпечних опадів. Крім того, виконання статистично підтвердженої класифікації опадів проводилося на розширеній базі даних.

Для кластерного аналізу використані дані про тривалість, кількість та інтенсивність опадів, висоту верхньої границі хмарності. Оскільки названі величини мають різні одиниці вимірювання, дані було стандартизовано. На основі отриманих результатів після проведення ієрархічної класифікації даних, зроблено припущення стосовно числа кластерів, а саме, що випадки дуже сильних опадів формують три кластера (рис.1). Далі була проведена перевірка припущення та значимості різниці між отриманими групами методом К-середніх.

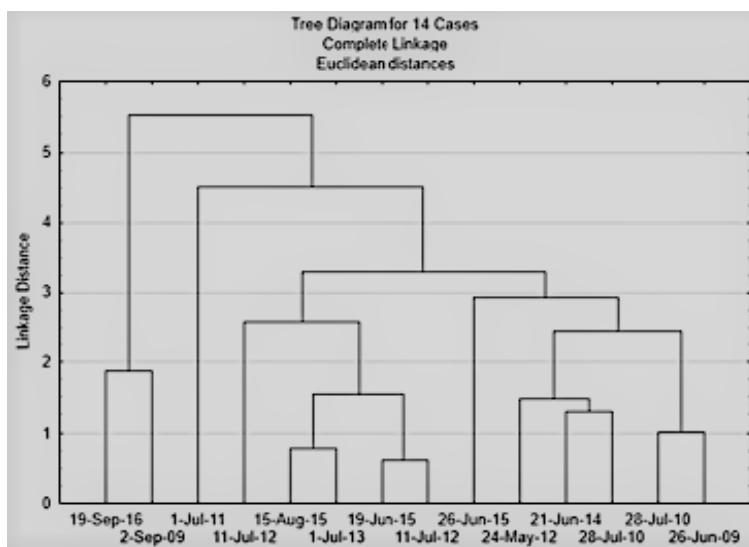


Рис. 1. Вертикальна дендрограма – наочне представлення результатів кластеризації: метод повного зв'язку, міра близькості евклідова відстань

Обчислення починаються з К випадково вибраних спостережень (у нашому випадку $K=3$), які стають центрами груп, після чого, об'єктний склад кластерів змінюється з метою мінімізації мінливості між ними. Кожне наступне спостереження ($K+1$) відноситься до тієї групи, міра подібності з центром тяжіння якої мінімальна. Після зміни складу кластера визначається новий центр тяжіння, найчастіше, як вектор середніх по кожному параметру. Алгоритм виконується до тих пір, поки склад кластерів не припинить змінюватись [14]. Після того, як отримано результати класифікації, можна розрахувати середнє значення показників по кожному кластеру, щоб оцінити на скільки вони різняться між собою.

Для рівня значущості $p < 0,05$ отримана суттєва різниця величин між окремими

кластерами. Опція також дозволяє відобразити евклідові відстані об'єктів від центрів (середніх значень) відповідних їм кластерів (рис.2).

Cluster Number	Евклідові відстані між кластерами (Spreadsheet16)			
	Distances below diagonal		Squared distances above diagonal	
	No. 1	No. 2	No. 3	
No. 1	0,000000	0,911687	2,383093	
No. 2	0,954823	0,000000	2,620134	
No. 3	1,543727	1,618683	0,000000	

Рис. 2. Евклідові відстані між кластерами (метод К-середніх)

У наведених на рис. 3 таблицях, показані основні параметри для випадків дуже сильних опадів, що увійшли до кожного кластеру.

I		Members of Cluster Number 1 (Spreadsheet16) and Distances from Respective Cluster Center Cluster contains 7 cases		
		Distance		
26-Jun-09		0,517682		
28-Jul-10		0,791521		
28-Jul-10		0,473984		
24-May-12		0,533408		
1-Jul-13		0,673708		
21-Jun-14		0,457696		
26-Jun-15		0,840155		
II		Members of Cluster Number 2 (Spreadsheet16) and Distances from Respective Cluster Center Cluster contains 5 cases		
		Distance		
1-Jul-11		1,355931		
11-Jul-12		0,258930		
11-Jul-12		0,637888		
19-Jun-15		0,495556		
15-Aug-15		0,834885		
III		Members of Cluster Number 3 (Spreadsheet16) and Distances from Respective Cluster Center Cluster contains 2 cases		
		Distance		
2-Sep-09		0,468056		
19-Sep-16		0,468056		

Рис. 3. Члени кластерів (I,II,III) та відстані від відповідного центру кластера

Для візуального представлення закономірностей зміни інтенсивності опадів, їх тривалості та кількості на рис. 4 наведена динаміка цих величин для типових випадків, які входять в кожен кластер.

Проведений кластерний аналіз дуже сильних опадів показав результати, які узгоджуються з аналітичною типізацією, виконаною на основі розподілу інтенсивності з часом [5]. Використовуючи термінологію з [14] та дані про зміни інтенсивності у межах виділених кластерів (рис. 4), можна виокремити перший кластер, який відповідає типу «мікс» облогових і зливових опадів при розвитку фронтальних шаруватих хмар з так званою «затопленою» конвекцією, другий кластер відповідає типу злизові опади, третій кластер об'єднує випадки дуже сильних фронтальних опадів, що за характером випадання можна віднести до облогових. Отримана класифікація показує, що високу ймовірність раптового утворення значних об'ємів поверхневого стоку можна очікувати у випадках віднесених до кластеру II, і у меншій мірі - до кластеру I. Враховуючи те, що синоптичний аналіз, супутникові дані показують закономірності динаміки атмосфери, траєкторії переміщення фронтів, характер хмарності, можна попередньо встановити тип розподілу інтенсивності опадів, відповідно наведеній класифікації, і використати ці дані для підвищення якості прогнозів.

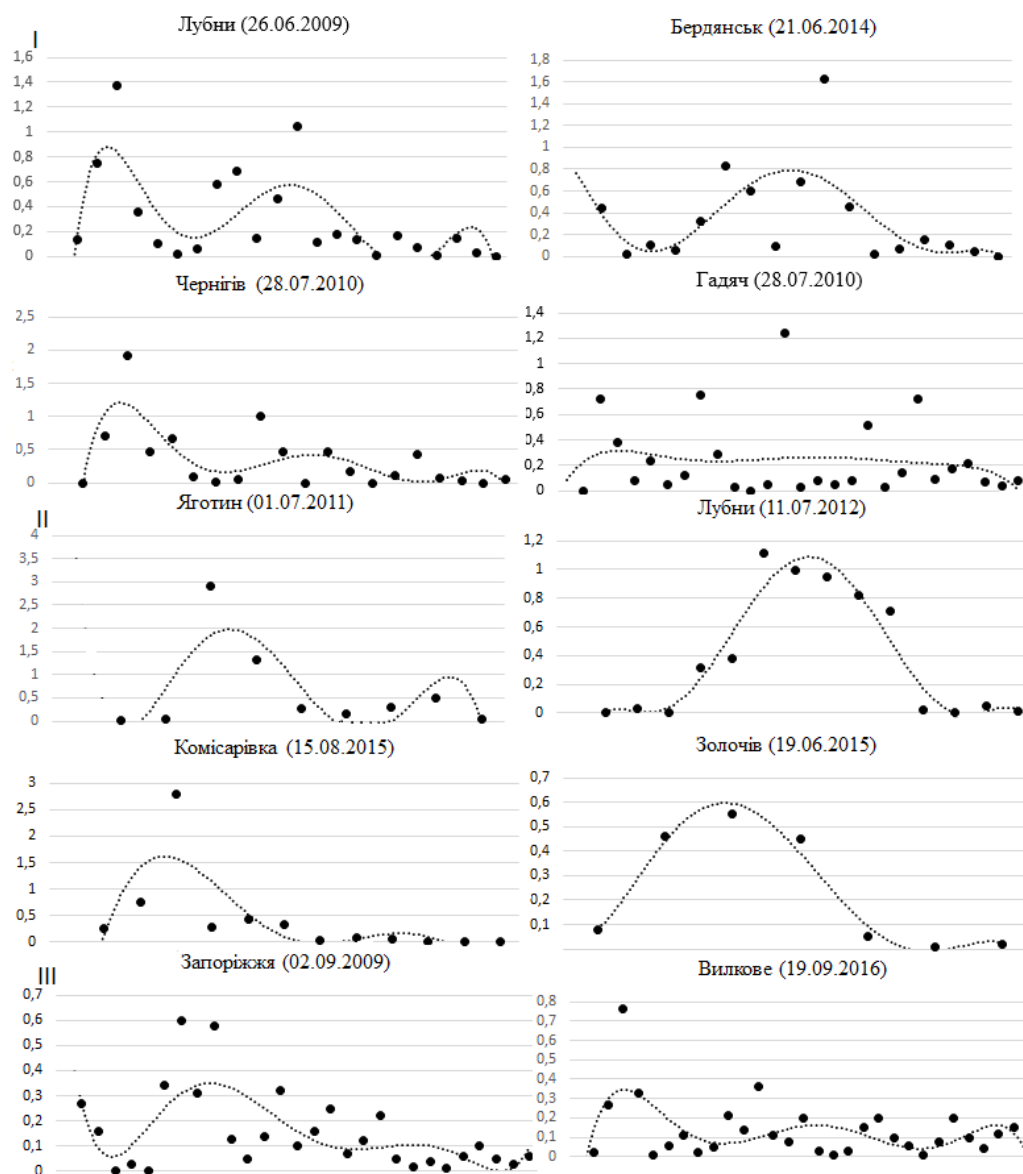


Рис. 4. Динаміка інтенсивності опадів для типових випадків, об'єднаних в I, II, III кластер

Залежність інтенсивності дуже сильних опадів від параметрів процесу опадоутворення. Для перевірки зв'язку між інтенсивністю опадів та висотою верхньої границі масиву хмарності, з якої випадають опади, проведено кореляційний аналіз даних (використовувалася програма STATISTICA). Розглядалися випадки дуже сильних опадів, кількістю ≥ 50 мм за ≤ 12 год, що спостерігались на рівнинній території України за період 2005-2018 рр. Дані про висоти верхньої границі хмарності отримано з центру даних EUMETSAT (EUMETSAT DATA CENTRE), дані інтенсивності взяті з побудованих плівіограм.

Для узгодження синхронності вимірювання значень інтенсивності та висоти верхньої границі хмарності побудовано діаграми розсіювання для співвідношень величин «інтенсивність-час» та «висота верхньої границі-час», а також підібрано відповідні лінії тренду (поліноміальна другого ступеня – найменше значення стандартного відхилення при підрахунках). Використовуючи рівняння регресії було розраховано необхідні значення інтенсивності та висоти верхньої границі хмарності для визначеного моменту часу.

Рівняння регресії:

$$1) y = -31,918 + 3,9998 \cdot x - 0,1238 \cdot x^2 (\text{інтенсивність-час});$$

$$2) y = -1,0157E5 + 12926,9793 \cdot x - 370,5263 \cdot x^2 (h - \text{верхньої границі-час})$$

Результати розрахунків показали від'ємний кореляційний зв'язок або зворотну залежність інтенсивності опадів та висоти верхньої межі хмар (r -Спірмена:-0,208655, t -Кендалла:-0,142729).

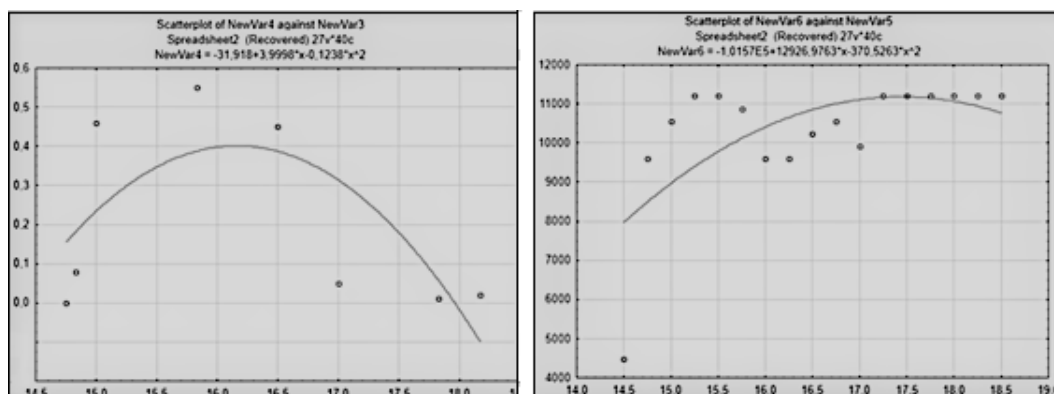


Рис. 5. Діаграми розподілу величин інтенсивність-час, висота верхньої границі-час, приклад наведено для станції Золочів (19.06.2015)

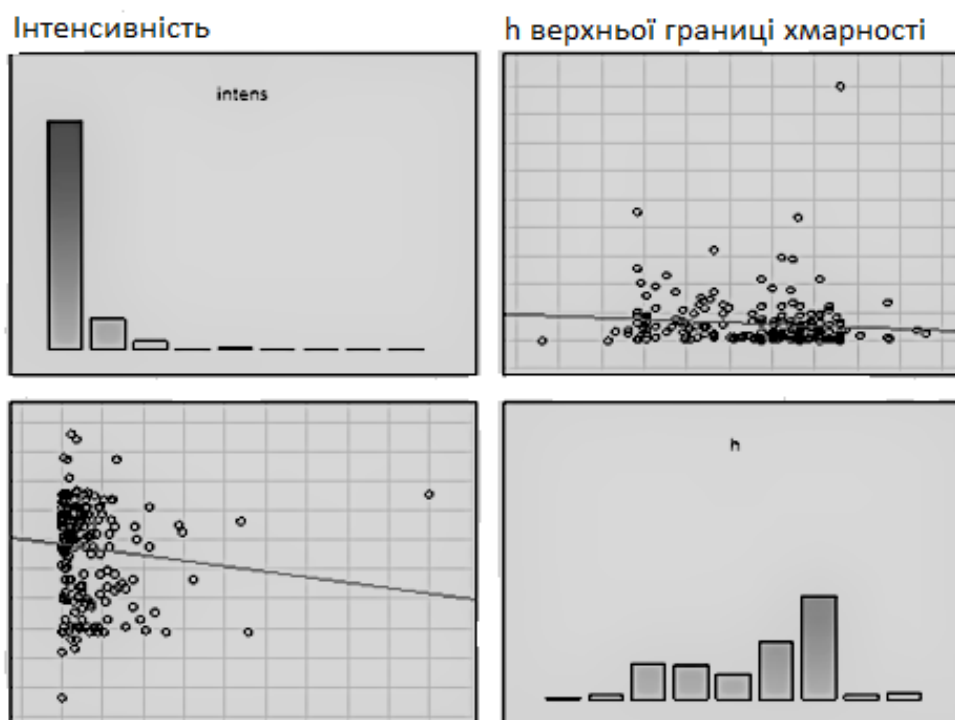


Рис. 6. Гістограми та діаграми розсіяння (кореляція Спірмена - інтенсивність - h верхньої границі хмарності)

Кореляційний зв'язок між максимальною інтенсивністю опадів та середньою висотою хмарності за окремий процес також від'ємний (r -Спірмена:-0,259626, t -Кендалла:-0,176798).

Зворотна залежність інтенсивності опадів від висоти верхньої межі хмар обумовлена насамперед тим, що в межах одного процесу опадоутворення великі значення висхідних рухів спостерігаються на початку процесу, коли конвективна хмара інтенсивно розвивається по вертикалі, відбувається зміна фазового стану та укрупнення хмарних елементів.

Випадання опадів зазвичай притаманне завершенню процесу хмароутворення і супроводжується утворенням комірок низхідних вертикальних рухів, відповідно зниженням висоти верхньої границі хмарності. Під час випадання інтенсивних опадів, їх частинки

внаслідок сил в'язкості захоплюють за собою повітря, обумовлюючи тим самим появу низхідних рухів в нестійко стратифікованому повітрі. Такий спрощений алгоритм суттєво ускладнюється у масивах фронтальної хмарності, де конвекція мультикоміркова, а хмари знаходяться на різних стадіях розвитку.

В межах одного процесу кореляційна залежність між інтенсивністю і висотою верхньої границі хмарності є зворотною, але при цьому зберігається загальна тенденція – більш потужні хмари, ймовірно будуть давати опади більшої інтенсивності. Особливо це стосується конвективних хмар та хмар з «затопленою конвекцією» у масивах шарувато-дощових.

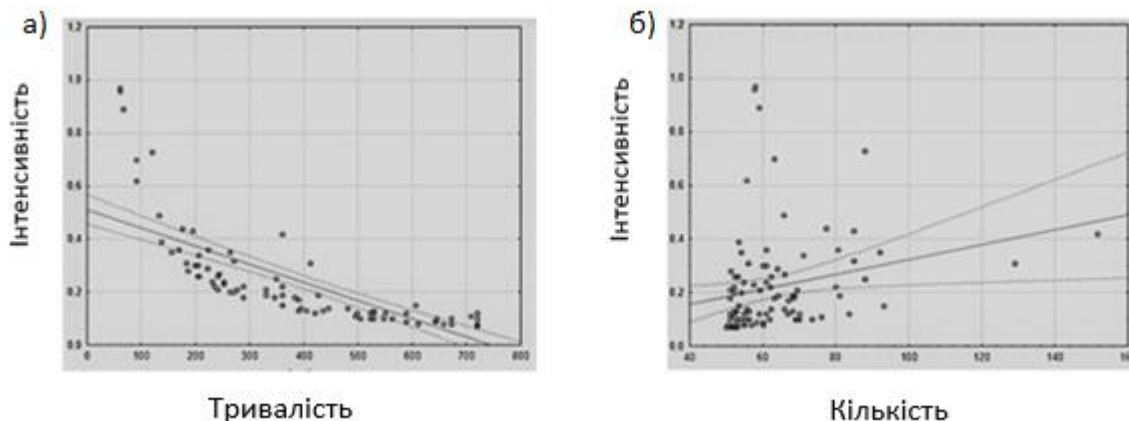


Рис. 7. Коефіцієнт кореляції інтенсивність-тривалість дощу (а); коефіцієнт кореляції інтенсивність-кількість опадів (б)

Кореляційний аналіз інтенсивності опадів та тривалості процесу їх випадіння показав, що залежність між вказаними величинами статистично значима, зворотна ($-0,770363$). На відміну від цього, величини інтенсивності і кількості опадів знаходяться в прямій залежності ($0,230922$).

Динаміка інтенсивності опадів та об'єми поверхневого стоку. Оцінка параметрів поверхневого стоку проводилася з урахуванням типу процесу, максимальних значень інтенсивності опадів та кількості і тривалості хвиль підсилення опадів. Отримані максимальні інтенсивності не перевищували $2,0$ мм/хв (табл.1), що відповідає значенням отриманим для аналогічних процесів на території України в інші кліматичні періоди, і свідчить про збереження середніх широтних значень інтенсивності метеорологічних процесів [1-3].

Виконано розрахунки величин маси води, що надходить на одиничну площу в межах хвиль підсилення опадів за методикою наведеною у [4] та визначені об'єми води, що утворюються на різних типах підстильних поверхонь за весь час випадання опадів.

У зв'язку з тим, що емпіричний розподіл інтенсивності опадів у часі представлений дискретними величинами, проведена його апроксимація поліноміальними рівняннями n -ступеню. Такий підхід дозволяє в подальшому встановити функцію розподілу і визначити значення інтенсивності в проміжках розподілу де величина відсутня. Найчастіше для апроксимації використовувався поліном 6-го ступеню, але у окремих випадках вищу достовірність мали поліноми 3-5 ступенів (табл.1). Найвищі значення коефіцієнтів детермінації ($R^2 = 0,8-0,9$) отримані при апроксимації розподілу інтенсивності зливових опадів поліномами 6-го ступеню. Відносно низькі значення ($R^2 = 0,4-0,5$) отримані для випадків, що відносяться до І кластеру і відзначаються значним розкидом значень інтенсивності при переході від облогових до зливових опадів та повторенням таких змін.

На рис.8 а) показана динаміка інтенсивності для 27.06.2011 (ст Київ). У часовому ході виділяють три хвилі підсилення опадів, максимальна інтенсивність – $0,31$ мм/хв, що дозволяє віднести їх до І кластеру (тип “мікс”). Значення об'єму поверхневого стоку за умови, що територія м. Київ покрита водонепроникним покриттям, дорівнює $390 \cdot 10^5$ м³, що на 348 % більше ніж об'єм стоку, розрахований для цього ж випадку дощу, але за умови,

що територія м. Київ незабудована, дорожні покриття відсутні або майже відсутні ($87 \cdot 10^5 \text{ м}^3$). Під час основної хвилі підсилення випало $8,9 \text{ кг/м}^2$ води, величина поверхневого стоку з 1 га території у випадку суцільної забудови дорівнювала 47 м^3 , у випадку незабудованої або частково забудованої території – 18 м^3 , що на 62 % менше.

Таблиця 1. Основні параметри процесів випадіння дуже сильних та небезпечних опадів та величини поверхневого стоку для різних видів підстильної поверхні

Станція	Дата	Тип процесу	I _{max} мм/хв	R ²	Хвилі підсилення		W _{ст} , м ³ (водо-непроникна поверхня)	W _{ст} м ³ (природні поверхні)
					Тривалість, год+хв	Маса води кг/м ²		
Дуже сильні опади ≥50 мм за ≤ 12 год.								
Київ	27.06 2011	"мікс" облогових і зливових	0,31	0,5	03:50-04:10	2,8	390·10 ⁵	87·10 ⁵
					06:00-06:40	7		
					10:10-10:50	8,9		
Рівняння регресії:		y = -1E-07x ⁶ + 8E-06x ⁵ - 0,0002x ⁴ + 0,0013x ³ - 0,0027x ² + 0,0093x + 0,0103						
Запоріжжя	09.09 2018	"мікс" облогових і зливових	0,45	0,5	00:00-00:30	4,9	154·10 ⁵	35·10 ⁵
					02:50-03:30	13,3		
Рівняння регресії:		y = -6E-08x ⁶ + 7E-06x ⁵ - 0,0003x ⁴ + 0,0071x ³ - 0,0746x ² + 0,346x - 0,4713						
Одеса	07.08 2016	зливові	1,18	0,8	12:51-13:10	2,2	113·10 ⁵	25·10 ⁵
					14:00-14:50	37,0		
Рівняння регресії:		y = 4E-05x ⁶ - 0,0014x ⁵ + 0,0187x ⁴ - 0,1125x ³ + 0,3572x ² - 0,7102x + 0,8371						
Чернівці	03.08 2016	"мікс" облогових і зливових	0,60	0,5	20:50-21:30	16,8	887·10 ⁴	193·10 ⁴
					22:30-23:00	6,4		
					00:10-11:30	3,9		
Рівняння регресії:		y = -4E-08x ⁶ + 4E-06x ⁵ - 0,0002x ⁴ + 0,0039x ³ - 0,0542x ² + 0,3717x - 0,5918						
Запоріжжя	26.06 2015	зливові	1,84	0,7	11:00-11:30	39,3	199·10 ⁵	43·10 ⁵
					12:30-13:00	11,4		
Рівняння регресії:		y = 1E-04x ⁶ - 0,0045x ⁵ + 0,0764x ⁴ - 0,5953x ³ + 2,0304x ² - 2,1196x + 0,1334						
Небезпечні опади 15-49 мм за ≤ 12 годин								
Київ	30.06 2018	зливові	0,94	0,9	23:20-23:50	23,9	237·10 ⁵	57·10 ⁵
					02:20-02:40	1,0		
Рівняння регресії:		y = 3E-05x ⁶ - 0,0013x ⁵ + 0,0164x ⁴ - 0,0791x ³ + 0,0499x ² + 0,3362x + 0,4684						
Запоріжжя	10.09 2018	зливові	0,59	0,8	07:10-07:40	12,2	294·10 ⁴	90·10 ⁴
Рівняння регресії:		y = -0,015x ³ + 0,0907x ² + 0,0143x - 0,07						
Одеса	14.06 2017	"мікс" облогових і зливових	0,58	0,5	23:40-00:00	7,9	545·10 ⁴	135·10 ⁴
					00 20-00 50	13,2		
Рівняння регресії:		y = 4E-05x ⁶ - 0,0016x ⁵ + 0,0222x ⁴ - 0,1302x ³ + 0,2346x ² + 0,4486x - 1,1092						
Чернівці	27.07 2017	"мікс" облогових і зливових	0,66	0,4	04:40-05:10	8,2	432·10 ⁴	103·10 ⁴
					08 20-08 40	8,8		
					09:10-09:40	3,0		
Рівняння регресії:		y = 2E-05x ⁵ - 0,0011x ⁴ + 0,0234x ³ - 0,2128x ² + 0,7987x - 0,7556						
Київ	29.07.2017	облогові	0,10	0,8	-	-	554·10 ⁴	185·10 ⁴
Рівняння регресії:		y = 5E-05x ⁶ - 0,0018x ⁵ + 0,0249x ⁴ - 0,1671x ³ + 0,5635x ² - 0,8487x + 0,4303						

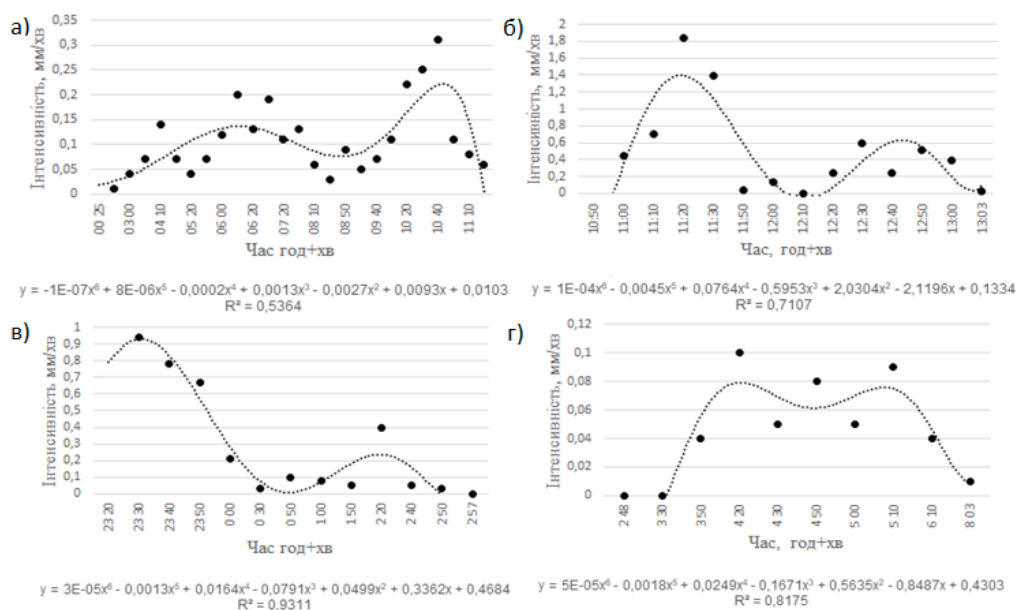


Рис.8. Динаміка інтенсивності опадів: а) Київ, 27.06.2011; б) Запоріжжя, 26.06.2015; в) Київ, 30.06.2018; г) Київ, 29.07.2017

У часовому розподілі інтенсивності 26.06.2015, ст. Запоріжжя (рис. 8 б) прослідковується дві хвили підсилення опадів: основна, що спостерігалась на початку процесу інтенсивності змінювались в межах 0,45-1,84 мм/хв, та додаткова хвиля з незначним підсиленням опадів. Такий розподіл дозволяє віднести випадок до типу зливові опади. Об'єм поверхневого стоку за умови водонепроникного покриття на 363 % перевищує значення розраховане за умови, що територія незабудована, дорожні покриття відсутні.

Завдяки раптовості початку та специфічній структурі часової динаміки інтенсивності випадок 30.06.2018, ст. Київ (рис. 8 в) можна віднести до зливових опадів. Об'єм поверхневого стоку за умови, що територія м. Київ покрита водонепроникним покриттям, дорівнює $237 \cdot 10^5 \text{ м}^3$, що на 39% менше об'єму поверхневого стоку, що спостерігався у випадку 27.06.2011 (ст Київ), коли опади були дуже сильними. Об'єм поверхневого стоку за умови, що територія м. Київ незабудована, дорожні покриття відсутні або майже відсутні становив $57 \cdot 10^5 \text{ м}^3$, що є в 4 рази менше об'єму поверхневого стоку за умови, що територія м. Київ покрита водонепроникним покриттям.

Незначні інтенсивності (0,1-0,01 мм/хв) та наявність декількох хвиль підсилення приблизно однакової тривалості та амплітуди, дозволяють віднести випадок 29.07.2017, ст. Київ (рис. 8 г) до III кластеру (типу облогові опади). Об'єм поверхневого стоку (за умови значної забудованості території) становив $554 \cdot 10^4 \text{ м}^3$, що відрізняється на цілий порядок від значень, що спостерігались за тих же умов, але у випадку дуже сильних та небезпечних опадів. У випадку незабудованої території об'єм поверхневого стоку становив $185 \cdot 10^4 \text{ м}^3$, що в 3 рази менше об'єму поверхневого стоку, розрахованого за умови значної забудованості території.

Висновки. Проведено статистично обґрунтовану класифікацію випадків дуже сильних та небезпечних опадів за період 2005-2018 рр. при формуванні яких виникає висока ймовірність утворення значних об'ємів поверхневого стоку.

Кластерний аналіз усього масиву випадків базувався на показниках тривалості, кількості, динаміки інтенсивності опадів та висоти верхньої границі хмарності.

Використовувалися нові критерії поділу при збереженні класичних назв типів опадів.

Визначені три основні кластери (типи) опадоутворення: перший кластер відповідає поєднанню облогових і зливових опадів фронтальних хмарних систем, другий кластер – зливовим опадам, а третій кластер включає випадки фронтальних облогових опадів, інтенсивності яких можуть збільшуватися в межах міських територій.

Встановлено тісноту кореляційного зв'язку між інтенсивністю опадів та параметрами процесу їх формування через розрахунок коефіцієнтів кореляції Пірсона та

непараметричних коефіцієнтів кореляції r -Спірмена та t -Кендалла.

Отримано від'ємний кореляційний зв'язок або зворотну залежність між інтенсивністю опадів та висотою верхньої границі хмарності (r -Спірмена: -0,208655, t -Кендалла: -0,142729); зворотну, але статистично значиму залежність між інтенсивністю опадів та тривалістю процесу їх випадіння (-0,770363) та пряму залежність між інтенсивністю та кількістю опадів (0,230922).

Визначено об'єми поверхневого стоку, які формуються на забудованих та заасфальтованих поверхнях у великих містах при різних типах опадоутворюючих процесів. Показано, що найбільші ($199 \cdot 10^5$ - $237 \cdot 10^5$ м³) об'єми стоку утворюються при зливових опадах (кластер II). При цьому, основна частина води надходить до поверхні під час першої хвили підсилення опадів (20-30хв), для другого та третього типу процесів об'єми стоку дещо менші ($432 \cdot 10^4$ - $554 \cdot 10^4$ м³) і час його формування збільшується.

Поверхневий стік, що утворюється за умови значної забудови території та при переважанні частки водонепроникних покриттів для усіх типів опадів на 100-300% перевищує значення поверхневого стоку у порівнянні з умовами, коли територія міста забудована слабо, а дорожні покриття майже відсутні. Зважаючи на те, що під час випадіння опадів у містах, вода витрачається тільки на змочування поверхні, заповнення її нерівностей, але не на просочування у ґрунт, то зберігатиметься тенденція до збільшення величини поверхневого стоку при збільшенні ступеня забудованості території.

Список літератури

1. Балабух В.О. Мінливість дуже сильних дощів та сильних злив в Україні. Наук. пр. УкрНДГМІ. 2008. Вип. 257. С. 61-72.
2. Балабух В.О. Траєкторії циклонів, що зумовлюють небезпечну і стихійну кількість опадів в Україні у теплий період року. Наук. пр. УкрНДГМІ. 2004. Вип. 253. С. 37-49.
3. Заболоцька Т.М., Підгурська В.М., Шпиталь Т.М. Небезпечно сильні опади в Україні та можливі причини їх утворення. Наук. пр. УкрНДГМІ. 2006. Вип. 255. С. 25-40.
4. Жук В.М., Матлай І.І. Методи розрахунку об'єму дощового стоку. Вісник Нац. у-ту "Львівська політехніка". "Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація". 2010. Вип. 677. С.32-38.
5. Паламарук Л.В., Сокур К.С., Заболоцька Т.М. Динаміка інтенсивності опадів та мезоструктурні особливості їх полів у теплий період року на рівнинній частині території України. Гідрологія, гідрохімія і гідрогеологія. 2019. Вип. 4. С. 95-111.
6. Ban N., Schmidli J., Rajczak J. Analysis of Alpine precipitation extremes using generalized extreme value theory in convection-resolving climate simulations. Climate dynamics. 2020. № 55. P. 61-75.
7. Itsukushima R., Ogahara Y., Iwanaga Y., Sato T. Investigating the Influence of Various Stormwater Runoff Control Facilities on Runoff Control Efficiency in a Small Catchment Area. Sustainability. 2018. № 10 (2). 407.
8. Mitchell, J. F. B., Johns, T. C., Gregory, J. M. and Tett, S. F. B. Transient climate response to increasing sulphate aerosols and greenhouse gases. Nature. 1995. № 376. P. 501-504.
9. Papalexioiu S., Montanari A. Global and Regional Increase of Precipitation Extremes Under Global Warming. Geophys. Res. Lett. 2019. № 55(6). P. 4901-4914.
10. Pendergrass A., Hartmann D. Changes in the Distribution of Rain Frequency and Intensity in Response to Global Warming. Journal of Climate. 2014. № 27. P. 8372-8383.
11. Rucsko K., Jekatierynczyk E. Extreme Hydro-Meteorological Events Influence to Water Quality of Small Rivers in Urban Area: A Case Study in Northeast Poland. Scientific Reports. 2020. № 10. P. 1-14.
12. Rajczak J., Schär Ch. Projections of Future Precipitation Extremes Over Europe: A Multimodel Assessment of Climate Simulations: Projections of Precipitation Extremes. Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2017. № 122(20). P. 10.773-10.800.
13. Salamanca F., Martilli A., Tewari M., Chen F. A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF. J Appl Meteorol Climatol. 2011. № 50. P. 1107-1128.
14. StatSoft, Inc 1984-2020 [Electronic textbook on statistics: StatSoft, Inc 1984-2020]. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm>.
15. Urban Hydrology for Small Watersheds. TR-55. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Technical Release 55. 1986.
16. Wang W., Wang L., Miao Y., Cheng C. A survey on the influence of intense rainfall induced by climate warming on operation safety and service life of urban asphalt pavement. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience. 2020. № 1(4). P. 1-14.
17. Xu Z., Zhao G. Impact of Urbanization on Rainfall-Runoff Processes: Case Study in the Liangshui

References

1. Balabukh V.O. Minlyvist' duzhe syl'nykh doschiv ta syl'nykh zlyv v Ukraini [Variability of very heavy rains and heavy rains in Ukraine]. Nauk. pr. UkrNDHMI. 2008. Vyp. 257. S. 61-72.
2. Balabukh V.O. Traiektorii tsykloniv, scho zumovliuiut' nebezpechnu i stykhijnu kil'kist' opadiv v Ukraini u teplyj period roku [Cyclone trajectories that cause dangerous and spontaneous precipitation in Ukraine during the warm season]. Nauk. pr. UkrNDHMI. 2004. Vyp. 253. S. 37-49.
3. Zabolots'ka T.M., Pidhurs'ka V.M., Shpytal' T.M. Nebezpechno syl'ni opady v Ukraini ta mozhlyvi prychny ikh utvorennia [Dangerously heavy precipitation in Ukraine and possible reasons for their formation]. Nauk. pr. UkrNDHMI. 2006. Vyp. 255. S. 25-40.
4. Zhuk V.M., Matlaj I.I. Metody rozrakhunku ob'iemu doschovoho stoku [Rainwater runoff calculation methods]. Visnyk Nats. u-tu "Lvivs'ka politekhnika". "Teploenerhetyka. Inzheneriia dovkillia. Avtomatyzatsiia". 2010. Vyp. 677. S. 32-38.
5. Palamaruk L.V., Sokur K.S., Zabolots'ka T.M. Dynamika intensyvnosti opadiv ta mezostrukturni osoblyvosti ikh poliv u teplyj periodu roku na rivnynni chastynt terytorii Ukrainy [Dynamics of precipitation intensity and mesostructural features of their fields in the warm period of the year on the plain part of the territory of Ukraine]. Hidrolohiia, hidrokhimiia i hidroheolohiia. 2019. Vyp. 4. S. 95-111.
6. Ban N., Schmidli J., Rajczak J. Analysis of Alpine precipitation extremes using generalized extreme value theory in convection-resolving climate simulations. Climate dynamics. 2020. № 55. P. 61-75.
7. Itsukushima R., Ogahara Y., Iwanaga Y., Sato T. Investigating the Influence of Various Stormwater Runoff Control Facilities on Runoff Control Efficiency in a Small Catchment Area. Sustainability. 2018. № 10 (2). 407.
8. Mitchell, J. F. B., Johns, T. C., Gregory, J. M. and Tett, S. F. B. Transient climate response to increasing sulphate aerosols and greenhouse gases. Nature. 1995. № 376. P. 501-504.
9. Papalexiou S., Montanari A. Global and Regional Increase of Precipitation Extremes Under Global Warming. Geophys. Res. Lett. 2019. № 55(6). P. 4901-4914.
10. Pendergrass A., Hartmann D. Changes in the Distribution of Rain Frequency and Intensity in Response to Global Warming. Journal of Climate. 2014. № 27. P. 8372-8383.
11. Ruczek K., Jekatierynczyk E. Extreme Hydro-Meteorological Events Influence to Water Quality of Small Rivers in Urban Area: A Case Study in Northeast Poland. Scientific Reports. 2020. № 10. P. 1-14.
12. Rajczak J., Schär Ch. Projections of Future Precipitation Extremes Over Europe: A Multimodel Assessment of Climate Simulations: Projections of Precipitation Extremes. Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2017. № 122(20). P. 10.773-10.800.
13. Salamanca F., Martilli A., Tewari M., Chen F. A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF. J Appl Meteorol Climatol. 2011. № 50. P. 1107-1128.
14. StatSoft, Inc 1984-2020 [Electronic textbook on statistics: StatSoft, Inc 1984-2020]. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm>.
15. Urban Hydrology for Small Watersheds. TR-55. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Technical Release 55. 1986.
16. Wang W., Wang L., Miao Y., Cheng C. A survey on the influence of intense rainfall induced by climate warming on operation safety and service life of urban asphalt pavement. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience. 2020. № 1(4). P. 1-14.
17. Xu Z., Zhao G. Impact of Urbanization on Rainfall-Runoff Processes: Case Study in the Liangshui River Basin in Beijing, China. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 2016. № 373. P. 7-12.

Условия формирования поверхностного стока в пределах урбанизированных территорий при выпадении очень сильных и опасных осадков

Сокур К.С., Паламарчук Л.В.

В работе исследуются атмосферные осадки, которые по своим показателям достигли критериев очень сильных (≥ 50 мм в ≤ 12 ч) и опасных (15-49 мм в ≤ 12 ч). Проанализированы 98 случаев очень сильных осадков, которые наблюдались в 2005-2018 гг. и 14 случаев опасных осадков, которые наблюдались в 2017-2018 гг. Основное внимание уделяется условиям формирования и объемам поверхностного стока, который образуется на различных типах подстилающей поверхности.

Для получения статистически обоснованной классификации проведено кластерный анализ данных очень сильных и опасных осадков.

Исследовалась степень зависимости интенсивности очень сильных осадков от вертикального развития облачности, продолжительности процесса и количества осадков. Рассмотрены механизмы и физические особенности процессов облако- и осадкообразования, формирующие такие зависимости. Отмечается исключительная роль конвективных облаков как в отдельных фронтальных массивах, так и

в виде «затопленной конвекции» в массивах слоисто-дождевых облаков в формировании значительных объемов дождевой воды на подстилающей поверхности.

Оценены временные изменения интенсивности осадков для отдельных процессов, которые наблюдались в 2017-2018 гг. и установлена структура таких изменений: определены максимальные интенсивности осадков, время их наступления, наличие и количество волн усиления и их временные параметры.

На основе полученных показателей рассчитана масса дождевой воды и интенсивность осадков по объему воды для волн усиления. Определялись величины поверхностного стока для процесса в целом и для волн усиления в частности. В результате получено, что величины поверхностного стока, сформированного на застроенной территории, где преобладает доля водонепроницаемых покрытий, на 100-300% превышают поверхностный сток со слабо застроенной территории, на которой почти отсутствуют искусственные покрытия.

Ключевые слова: опасные и очень сильные осадки, урбанизированные территории, кластерный анализ, r-Спирмена, r-Кендалла, поверхностный сток.

Conditions for the formation of surface runoff, which is formed as a result of heavy and dangerous precipitation within urbanized areas

Sokur K., Palamarchuk L.

The research investigates atmospheric precipitation, which according to Ukrainian national regulation has reached the criteria of heavy (≥ 50 mm at ≤ 12 hours) and dangerous (15 - 49 mm at ≤ 12 hours).

A total of 98 cases of heavy precipitation (2005 - 2018), and 14 cases of dangerous precipitation (2017 - 2018) were analyzed. The research focuses on the formation conditions and volumes of surface runoff, that forms on various types of underlying surface.

To obtain a statistically valid classification, a cluster analysis of heavy and dangerous precipitation was carried out. The analysis allowed to distinguish three blocks or clusters, one of which corresponds to the type "mix" of heavy and slight precipitations during the development of frontal stratus clouds with so-called "submerged or flooded" convection, the second cluster corresponds to the type "heavy precipitations", the third cluster is similar to the first cluster, but is marked by a decrease in the intensity of processes.

The degree of connection between the intensity of heavy precipitation and the height of the clouds top was investigated. As a result, it was found that there is an inverse relation between the values.

The physical features of the processes of cloud and precipitation formation was considered. The exceptional role of convective clouds in individual frontal massifs and also in the form of "submerged or flooded convection" in the massifs of stratus clouds in the formation of significant volumes of rainwater on the underlying surface was noted.

The structure of the temporal changes in precipitation intensity was established: the maximum intensity values, the time of their occurrence, the availability and number of amplification waves and their temporal parameters. On the basis of the obtained indicators, the quantity of the surface runoff for determined processes and for amplification periods were calculated. As a result, it was found that the surface runoff, which formed in the built-up areas, exceeds the surface runoff from the moderately built-up area with almost no artificial pavement by 100 - 300 %.

Keywords: dangerous and heavy precipitation, urbanization, cluster analysis, r-Spearman, r-Kendall, surface runoff.

Надійшла до редколегії 28.10.2020