

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МЕТЕОРОЛОГІЇ ТА КЛІМАТОЛОГІЇ

На правах рукопису

УДК 551.584.2

Кваліфікаційна робота магістра

Спеціальність 103 – Науки про Землю

Освітня програма «МЕТЕОРОЛОГІЯ»

ІНДЕКСАЦІЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ПОСУХИ

Виконала

студентка II курсу магістратури
кафедри метеорології та кліматології
Карєвіна Катерина Вячеславівна

Науковий керівник

кандидат фізико-математичних наук,
доцент Олійник Ростислав
Васильович

Робота рекомендується до захисту

Протокол № ____ засідання кафедри метеорології та кліматології
від «__» _____ 2020 р.

Завідувач кафедри метеорології та
кліматології

доктор географічних наук, професор
Сніжко Сергій Іванович

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на здобуття рівня магістра на тему «Індексація метеорологічної посухи» складається із 78 сторінок та містить 22 рисунки, 10 таблиць, 1 додатку. При написанні роботи використано 51 джерело, серед яких методичні вказівки, довідники, посібники, науково-дослідні роботи, каталоги, академічні статті.

Посуха є частиною природного кліматичного циклу, який зазвичай вражає великі території і може тривати кілька місяців і навіть років, це складне явище з широкомасштабними екологічними та соціально-економічними наслідками і вважається в усьому світі однією з найдорожчих природних небезпек.

Характеристики посухи дозволяють проводити такі операції, як раннє попередження про посуху та суховії та аналіз ризику події, що дозволить ефективніше передбачувати надзвичайні ситуації. Ефективні системи раннього попередження про посуху повинні базуватися на декількох показниках, щоб повністю описати масштабність та серйозність даної події.

У цій роботі загальнодоступні показники метеорологічної посухи досліджуються на їх придатність для визначення інтенсивності посухи та її суворості, а також визначається частота повторюваності суховіїв.

Мета роботи. Визначити особливостей просторово-часового розподілу посушливих явищ в Україні у зв'язку з сучасними змінами глобального клімату.

Завдання дослідження:

- встановити особливості просторово-часового розподілу посушливих явищ в Україні на основі комплексної оцінки різних кількісних параметрів;
- оцінити інтенсивність посухи за кількісними показниками;
- дослідити імовірність виникнення суховію в різних регіонах України.

Предмет дослідження: просторово-часовий розподіл посух.

Наукова новизна одержаних результатів. В ході виконання магістерської роботи було виявлено, що жоден індекс посухи не перевершив решту, тому є доцільним використання одразу кількох індексів та їх порівняння для достовірності отриманих результатів.

Публікації. Певні частини роботи було апробовано в статті Вісника Київського Національного Університету імені Тараса Шевченка (Географія, №2(75)/2019) «Індексація метеорологічної посухи» та Всеукраїнському конкурсі наукових робіт (спеціальність «Науки про Землю (гідрометеорологія)»), де виборола призове (перше) місце.

Ключові слова. Посуха, суховій, індекс посухи, бездощів'я, бездощовий період, метеорологічна посуха, посушливі явища.

ABSTRACT

The master's thesis 'Indexation of meteorological drought' consists of 78 pages and contains 22 figures, 10 tables, 1 appendix. 51 sources were used including guidelines, reference books, manuals, research papers, catalogs, academic articles.

Drought is a part of the natural climate cycle, which usually affects large areas and can last for months or even years. This is a complex phenomenon with large-scale environmental and socio-economic consequences and is considered as one of the most expensive natural hazards worldwide to deal with.

Drought characteristics allow for operations such as early prevention of drought and sukhovey as well as risk analysis, which allow more effective prediction of emergencies. Effective early drought prevention systems should be based on several indicators to fully describe the scale and severity of the event.

In this work, publicly available indicators of meteorological drought are investigated for their suitability to determine the intensity of drought and its severity, as well as the frequency of recurrence of sukhoveys.

Purpose of work. Identify the features of the spatio-temporal distribution of drought phenomena in Ukraine in context of current global climate change.

Objectives of study:

- establishing the peculiarities of the spatio-temporal distribution of drought phenomena in Ukraine;
- assessment of the variability of quantitative indicators of droughts and sukhoveys.

Object of research: drought phenomena on the territory of Ukraine.

Subject of research: spatio-temporal distribution of droughts.

Scientific novelty of the obtained results. It was found that none of the drought index exceeded the rest, so it is advisable to use several indices and compare them for the reliability of the results.

Publications. Certain parts of the work were published in the Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv (Geography, No. 2 (75) / 2019) ‘Indexation of meteorological drought’ and were presented on the All-Ukrainian competition of scientific works (specialty Earth Sciences / Hydrometeorology), where the work won first place.

Keywords. Drought, sukhovey, drought index, no rainfall, no rainy season, meteorological drought, droughts.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. Загальна характеристика та методи оцінки посушливих явищ...10	
1.1. Основні поняття та визначення, розповсюдження посушливих явищ....10	
1.2. Характеристика бездощових періодів в Україні.....19	
1.2.1. Умови виникнення та розповсюдження бездощових періодів.....19	
1.2.2. Повторюваність бездощових періодів у поточних кліматичних умовах.....21	
РОЗДІЛ 2. Кількісні показники посух.....23	
2.1. Підходи до моніторингу засухи та керування її раннім попередженням та оцінкою24	
2.2. Перелік індексів посухи за рекомендаціями ВМО28	
2.3. Випадкові процеси.....32	
РОЗДІЛ 3. Статистичне моделювання температурно-вологісного режиму...42	
3.1. Індксація метеорологічної посухи.....42	
3.2. Статистичний прогноз режиму зволоження.....48	
3.3. Імовірнісний прогноз зволоженого режиму.....56	
ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74

ДОДАТКИ	80
----------------------	----

ВСТУП

Актуальність теми.

Україна є одним з основних землеробських регіонів Східної Європи завдяки сприятливому поєднанню помірному клімату і родючих ґрунтів. Проте, територія досить часто перебуває під впливом великомасштабних циркуляційних систем, що призводить до тривалих періодів з дефіцитом опадів, наслідком яких є формування посушливих явищ, як-от посухи та суховії.

Сучасний кліматичний період в глобальному масштабі є неоднозначним через визначене послаблення тренду глобального підвищення температури, що породжує невизначеності у моделюванні як поточного, так і майбутнього кліматичного режиму. Для території Європи кінець ХХ — початок ХХІ століття відзначився деяким збільшенням повторюваності антициклонічних систем, як блокуючих, так і рухливих, що потенційно збільшує ймовірність виникнення посух. При цьому, над Україною часто панують периферійні процеси, які відрізняються значною нестійкістю погодних умов зі збільшенням повторюваності сильних, але короточасних опадів, особливо у теплий період року. За таких макроциркуляційних умов просторово-часовий розподіл посушливих явищ істотно ускладнюється, що призводить до загального зниження передбачуваності посух та їх наслідків.

Посуха як комплексне явище виникає в результаті, перш за все, дисбалансу у кількості опадів, випаровуваності та стоку, тому складно піддається опису за допомогою будь-якого одного метеорологічного параметра. Разом з простими оцінками, пов'язаними із визначенням норми опадів або їх аномалій, широко застосовуються комплексні чисельні показники або індекси посух, здатні виявити як само явище посухи, так і його інтенсивність та ступінь несприятливості наслідків.

Україна часто страждає від чітко виражених посух. Моніторинг посушливих явищ може вказати на наявність таких явищ по всій території країни. Це має негативний вплив на сільське господарство, зокрема, врожайність культур, а також вказує на глобальне потепління.

Мета роботи полягає у визначенні особливостей просторово-часового розподілу посушливих явищ в Україні у зв'язку з сучасними змінами глобального клімату.

Для досягнення поставленої мети розв'язані такі **задачі**:

- встановити особливості просторово-часового розподілу посушливих явищ в Україні на основі комплексної оцінки різних кількісних параметрів;
- оцінити інтенсивність посухи за кількісними показниками;
- дослідити імовірність виникнення суховію в різних регіонах України.

Об'єкт дослідження – посушливі явища на території України.

Предмет дослідження — просторово-часовий розподіл посухи та суховіїв.

Методи дослідження. Дослідження виконано з застосуванням методів математичної статистики, статистичного моделювання, частотно-часового аналізу даних, кліматичного аналізу.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА МЕТОДИ ОЦІНКИ ПОСУШЛИВИХ ЯВИЩ

Клімат України є сприятливим для розвитку різних галузей економіки, а особливо сільського господарства, оскільки на території нашої країни є достатні умови тепла, вологи та сонячної радіації. Проте при певних поєднаннях агрокліматичних умов можуть виникати несприятливі явища, серед них і посушливі. Вони завдають шкоди усім видам економіки, а надто рослинництву, особливо у вегетаційний період.

1.1. Основні поняття та визначення, розповсюдження посушливих явищ

Клімат України, а особливо її степової частини, є придатним для утворення посушливих явищ різних різновидів. Прояв цих явищ спричинює надлишкову втрату вологи усіма живими організмами, а особливо рослинами. Якщо дія температурно-вологісних факторів призведе до вичерпання адаптаційних можливостей рослини, наступить її в'янення, зневоднення, згодом засихання та загибель. Так у кожного посушливого явища є гранична межа, за якої воно стає небезпечним.

Існують наступні види посушливих явищ: бездошові періоди, загальна посуха, атмосферна та ґрунтова посухи, суховій, а також фізіологічна посуха [Бучинский (1976)].

Бездошовий період – такий період часу, коли протягом десяти та більше днів не спостерігається випадіння опадів, або їх добова сума не буде більшою 1 мм.

Загальна посуха – поєднання атмосферної та ґрунтової посухи. Вона є однією з найнебезпечніших для рослин, оскільки в даний період останні не можуть поновлювати запаси вологи з ґрунту на фоні досить високих температур повітря.

Атмосферна посуха – вид посушливого явища, що виникає під час тривалого бездощового періоду з низьким показником вологості та високою температурою повітря.

Ґрунтова посуха – вид посухи, що виникає при надлишковому випаровуванні води з ґрунту, внаслідок чого надходження води до рослин сповільнюється чи припиняється. Таке явище пов'язують з недостатніми запасами води в метровому шарі ґрунту весною, оскільки влітку волога не поповнюється в достатніх кількостях, а тільки витрачається рослинами.

Суховії – вітри, що дмуть за високих температур та низьких вологостей повітря. Викликають інтенсивне випаровування води з ґрунтів, поверхонь рослин та водойм, що спричинює псування врожаїв та загибель рослин.

Фізіологічна посуха формується внаслідок неспроможності рослин забезпечити себе вологою при достатніх її запасах в ґрунті. Причин виникнення такої посухи може бути декілька: через підвищений вміст солей в ґрунті; через пошкодження кореневої системи рослини; в умовах низьких температур ґрунту навколо кореневої системи рослини та одночасно високих температур та низької вологості повітря.

За просторовими масштабами посухи поділяють на місцеві, зональні, міжзональні, континентальні та глобальні [Ліпінський та ін. (2003)]. Місцеві посухи сягають до 10% площі певної агрокліматичної зони та мають строкатий характер. Зональні посушливі явища охоплюють від 10% до 100% площі однієї агрокліматичної зони. Міжзональні посухи можуть займати не менше двох зон з охопленням від 10% до 35% площі в кожній зоні. Континентальні посухи охоплюють не менше трьох агрокліматичних зон із загальним охопленням від 30%. Глобальні посушливі явища займають значну

частину певної півкулі або не менше 10% території всіх суміжних континентів.

Під час вегетаційного періоду за часом виникнення та тривалістю виділяють три типи посух, а саме весняні, літні та осінні [Бучинский (1976)].

Весняна посуха відзначається низькими температурами повітря, низькою відносною вологістю, а також посушливими вітрами. Такі посухи затримують фазу сходів, послаблюють укорінення та кущіння рослин, зменшують кількість зернин у колосі. Проте при достатніх запасах ґрунтової вологи навесні посуха впливатиме на рослини незначним чином.

Літня посуха вирізняється високими температурами, низькою відносною вологістю повітря, а також великою випаровуваністю. Зазвичай до періоду літньої посухи в степу та лісостепу України запаси вологи в орному шарі ґрунту бувають недостатніми, тому негативний вплив даного виду посушливих явищ на сільськогосподарські культури є значно більшим, ніж вплив весняної посухи. Літня посуха затримує накопичення вегетативної маси, приріст коренів тощо.

Осіння посуха формується за низьких температур повітря, якщо при відсутності опадів влітку верхній шар ґрунту висушений. За настання антициклонічної циркуляції, характерної для осені Східної Європи, виникає дефіцит вологи, а отже і подальше висушування ґрунту. Якщо в таких умовах висіяти озимину, то вони не матимуть нормального розвитку і загинуть під час зимівлі.

Під час спостережень за впливом посушливих явищ на урожайність зернових культур вченими було виділено типи та критерії інтенсивності посушливих явищ за ступенем впливу на зменшення врожайності. Так, Руденко А.І. виділив чотири типи засух на Європейській території Росії (ЄТР) в період вегетації [Руденко (1958)]:

- 1) від посіву до початку молочної стиглості (весняно-літня посуха);
- 2) від посіву до воскової стиглості;
- 3) від кущіння до початку молочної стиглості (літня посуха);

4) в різні періоди формування врожаю пшениці.

Розгляд зв'язку врожайності ярої пшениці та суми опадів за період від сходів до колосіння показав високий коефіцієнт кореляції по різних районах.

За інтенсивністю посухи Руденко поділив на:

- дуже сильну - зниження врожаю більш ніж на 50%;
- сильну - зниження врожаю на 20-50%;
- середню - зниження врожаю менш ніж на 20%.

При цьому кількість опадів під час вегетаційного періоду за дуже сильних посух є низькою і складає лише 40-50% від норми; кількість посушливих декад становить від 4,5 до 5,4; сума опадів за період сходів-колосіння рівна близько 13-18 мм; перевищення температури повітря відбувається в середньому на 1,8-3,8°C. Під час сильної посухи кількість опадів за вегетаційний період складає 62-69% від норми; кількість посушливих декад становить від 3,5 до 4,2; сума опадів за період від сходів до колосіння складає 28-35 мм; перевищення температури повітря відбувається на 2,1-2,3°C. Середня посуха фіксується, коли кількість опадів за вегетаційний період складає 70-93% від норми; кількість посушливих декад становить від 2,8 до 3,2; сума опадів за період сходів-колосіння рівна близько 39-42 мм, а перевищення температури повітря відбувається на 1,1-2,2°C.

А.В. Процеров [Бучинский (1976)] виділяє різні типи посух за схожими критеріями, тобто за кількістю зниження врожайності. Так слабка посуха – це за зниження врожайності на 20%, сильна посуха – зниження на 20-50%, а от дуже сильна посуха – зниження врожайності більш ніж на 50%.

Втім варто зазначити, що урожайність сільськогосподарських культур залежить не тільки від прояву посушливих явищ, але й інших метеорологічних умов, таких як сильні вітри, опади, град та заморозки, а також від біологічних факторів, як-от пошкодження рослин шкідниками чи хворобами, і недотримання агротехнічних заходів тощо.

По території України розподіл посух має досить складний характер (табл. 1.1). Бучинський І.Є. [Бучинский (1976)] провів розгляд повторюваності посух по 47 станціях за майже сто років (1871-1972 рр.). Дослідження показано, що найбільш часто повторюються помірні посухи у південному Степу – 50%, проте на Донецькій височині повторюваність складає менше 40%. На заході, а також північніше – у Лісостепу та на Поліссі повторюваність посух значно менша і складає лише 10-20%, у той час як на сході така повторюваність сягає 40-45%. Сильні ж посухи мають ще меншу повторюваність на півночі – 4-9%, а до півдня та у Криму цей показник зростає до 25-35%. Дуже сильна посуха на півночі, північному заході та північному сході є досить рідким явищем, її повторюваність становить 1-3%, а до півдня та Криму повторюваність дуже сильних посух зростає до 9-15%.

Таблиця 1.1

Кількість, тривалість (дні) та повторюваність (%) неперервних посушливих періодів. Теплий період (квітень-жовтень) [8]

Станція	К-ть посушливих періодів			Тривалість посушливого періоду (дні)			Повторюваність (%) неперервних посушливих періодів у різних межах							Макс. тривалість
	Сер.	Сер. кв. відхил.	Коеф. варіації	Сер.	Сер. кв. відхил.	Коеф. варіації	Дні							Дні
							0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	>60	
Житомир	3,6	1,4	0,37	9,7	8,6	0,89	65	27	4	3	1			53
Київ	3,9	1,5	0,39	9,3	8,2	0,87	68	23	5	1	2	1		55
Полтава	4,7	1,5	0,31	11,1	10,9	0,99	66	18	9	3	2	1	1	94
Харків	4,6	1,6	0,33	11,9	9,7	0,88	63	22	7	5	2	1		61
Луганськ	5,1	1,4	0,27	12,1	11,5	0,95	60	21	10	5	1	2	1	75
Дніпро	4,9	1,4	0,29	12,8	11,7	0,91	57	23	10	5	2	2	1	76
Чернівці	3,4	1,5	0,43	9,3	8,2	0,88	68	22	6	3	1			53
Херсон	5,4	1,4	0,27	14,2	12,7	0,9	52	25	13	6	3	1		100
Одеса	5,3	1,3	0,24	15,7	14,3	0,91	50	22	12	8	5	1	2	79
Мелітополь	5,4	1,7	0,27	13,9	12,6	0,91	53	27	11	5	2	2		83
Сімферополь	5,7	1,4	0,24	11,4	9,4	0,83	67	18	9	4	1	1		82

Якщо брати до уваги посухи під час вегетаційного періоду, то весняні посухи спостерігаються найчастіше на півдні України, в Запорізькій та Херсонській областях, ймовірність їх виникнення складає 51-60%. У степу ймовірність настання посухи трохи менша та складає 30-40%. До півночі вірогідність посухи дедалі меншає, майже до 1-3% на північному заході та заході.

Літні посухи – найчастіше явище в Україні, вірогідність їх виникнення складає 98%. Так найбільша ймовірність спостерігається на півдні країни, особливо в приморських районах, і зменшується у напрямку до півночі та північного заходу до 4-10%.

Осінні посухи виникають рідше, ніж весняні та літні, але ймовірність їх виникнення на півдні країни в приморських районах може сягати 40-50%, у той час як на півночі вірогідність їх виникнення сягає лише 10-20%. У Поліссі ймовірність ще менша і становить всього 2-3%. У певних західних областях України осінні посухи можуть взагалі не спостерігатись.

У 1990 році Барабаш М.Б. та Ємельянова Ж.Л. [Барабаш и др. (1990)] склали каталог весняно-літніх посух по українських станціях за 1900-1986 рік. У цей період спостерігалися 30 посух, що охоплювали понад 30% території від площі України. Було виділено кілька районів країни за даними про вірогідність виникнення посух з урахуванням їх інтенсивності:

1. Південний Степ, що прилягає до Чорного та Азовського морів. Це південь Дніпропетровської області, а також Донецька, Запорізька, Херсонська, Миколаївська, Одеська області та північ АР Крим. Тут посуха – досить звичне явище за місцевого клімату, ймовірність її виникнення складає близько 70%. Сильні посухи тут виникають 1 раз на 10 років, а слабкі частіше – 1 раз на 4 роки.

2. Схід та центр Лісостепу, а також північна частина Степу. Це Кіровоградська, Харківська, Полтавська, Луганська області, а також північ Дніпропетровської, Херсонської та Миколаївської областей. Імовірність виникнення посухи тут складає 45-60%. Сильні посухи спостерігаються 1 раз на 15-20 років, слабкі частіше – 1 раз на 4 роки, як і в першому районі.

3. Частина Лісостепу, що прилягає до Полісся – Вінницька, Черкаська, Київська та Сумська області. Імовірність виникнення сильної посухи тут складає не більше 1-2%, а більш слабких посух – 30%.

Втім не тільки посухи мають негативний вплив на рослини та їх продуктивність за відносно короткий проміжок часу. Ще одним явищем з негативним впливом є суховій.

Суховії – вітри, що дмуть за високих температур (не нижче $+25^{\circ}\text{C}$) та низьких вологостей повітря (менше 30%). При цьому швидкості вітру становлять 5 м/с і більше [Бучинский (1970)]. Бучинський І.Є. отримав дані цифри під час трирічних спостережень, проведених в теплий період року по станціях України. Ці показники є надійними значеннями початку суховію в Україні.

Проте суховій не пов'язаний безпосередньо з посухою. Він може виникати і окремо, супроводжувати бездощовий період, бути ознакою початку посухи, підсилюючи своїм проявом її негативні наслідки.

На території України суховії утворюються при найрізноманітніших умовах циркуляції, що пов'язані з процесами анти циклогенезу, проте не з центральними частинами баричних утворень, а з їх периферіями з посиленими градієнтами тиску та посиленим вітром. О.О. Цукербіллер [Цукербіллер (1959)] зазначав, що найчастіше суховії спостерігаються на півдні Східноєвропейської рівнини, та мають розвиток до південних, південно-західних та південно-східних периферій антициклонів чи смуг підвищеного тиску, що панують над центральною частиною Європейської території Російської Федерації або Уралом. Найбільше суховіїв все ж виникають на території України – 90%, або на прилеглих територіях. Інші випадки суховіїв є лише перенесенням повітряних потоків з суміжних посушливих районів. Близько 82% днів з суховіями на території України спостерігаються саме під час панування антициклонів на їх відрогах чи периферії. Решта 18% випадків виникають у теплих секторах циклонів.

Повітряні маси, в яких утворюються суховії, переносяться до Східної Європи з різних районів [Волеваха (1972)]. Так приблизно половину випадків пов'язують з північно-західними та північними повітряними масами, що беруть початок від морів Арктичного басейну і прямують на південь до Прикаспійської низовини та Нижнього Поволжя, а вже потім і до України. З узбережжя Атлантичного океану пов'язано 20% випадків. Звідти повітряні маси переносяться до України по північній периферії гребня

азорського антициклону через перегріту Європу. Зовсім невелика частина випадків з півдня бере початок над Середньою Азією чи Іраном. Окрім того, суховії можуть виникати в повітряній масі, що циркулює в системі стаціонарного антициклону над європейською територією Росії.

На території України кількість днів із суховіями під час вегетаційного періоду зменшується з південного сходу та сходу (понад 60 днів на Приазов'ї) на північний захід (20 і менше днів на Прикарпатті) [Ліпінський та ін. (2003)]. Бучинський зазначає [Бучинский (1976)], що на території України є два осередки з високою повторюваністю суховіїв: на сході (райони Луганської та Донецької областей), а також на півдні (Запорізька, Дніпропетровська, Херсонська та Миколаївська області, а також степовий Крим). На узбережжі морів кількість днів з суховіями є меншою завдяки підвищеній відносній вологості повітря.

Суховії мають негативний вплив на рослини під час всіх етапів вегетаційного періоду. Під час суховію надходження води в листки рослин через коріння не компенсує транспірацію (утворюється дефіцит транспірації), що є тим більшим, чим сильнішим є висушування суховіями. Зерновим в період формування колоса та наливу зерна суховії завдають найбільшої шкоди, і тоді зменшується кількість та якість зерен в колосі. Через сильні вітри виникає в'янення, скручування та підсихання листків, і це може бути фатальним для рослини.

Враховуючи різноманітну кількість атмосферних явищ та факторів, що їх спричиняють, надалі більш детально буде виконуватись розгляд атмосферної посухи.

1.2. Характеристика бездощових періодів в Україні

1.2.1. Умови виникнення та розповсюдження бездощових періодів

Для оцінки кліматичних умов сільськогосподарського виробництва на досить невеликі періоди часу використовують поняття бездощових періодів. Вони є критерієм посушливості, адже визначають тривалість періодів без опадів або з їх малою сумою. Ще в ранніх спостереженнях Ротмістєрова В.Г. було зазначено, що опади 1 мм і менше не засвоюються рослинами, а до 3 мм не підвищують вологість ґрунту. А от опади 5 мм можуть засвоюватись рослинами за умови, що верхній шар ґрунту не є пересушеним [Бучинський (1976)]. Опади до 5 мм можуть зменшити температуру приземного шару повітря, а також підвищити вологість цього ж шару, і це створюватиме сприятливі умови для росту рослин влітку навіть при похмурій погоді. І саме тому кількість опадів у 5 мм вважається критерієм ефективних опадів [Кошеленко и др. (1971)].

Бездощовим періодом вважається період з відсутніми опадами або їх кількість, що не перевищує ефективну більше 10 діб [Ліпінський та ін. (2003)]. Період бездощів'я вважають перерваним, якщо за добу випало не менше 5 мм опадів, або якщо декілька разів випадали опади по 1,0-4,9 мм з перервою менше 10 діб.

Тривалість та повторюваність бездощових періодів залежить від циркуляції атмосфери, а також від умов рельєфу місцевості. Так антициклони різних типів, а особливо стаціонарні арктичного походження, або пов'язані з азорським максимумом зумовлюють найбільшу тривалість та повторюваність бездощових періодів. Меншими за тривалістю є періоди, що виникають в малорухомих областях чи смугах підвищеного тиску. А от найменшими за тривалістю та повторюваністю є бездощові періоди, які пов'язані з транзитним анти циклогенезом західного типу завдяки понесенню вологого атлантичного повітря у вищевказаних баричних утвореннях.

Розова Е.С. розглядала розповсюдження та характер бездощових періодів за вегетаційний період (квітень-жовтень) кінця 19 – першої половини 20 ст. [Розова (1961)]. Так найтриваліші бездощові періоди виникали на півдні материкової України та в Криму. Їх середня тривалість коливалась від 40 до 0 днів. У 1934 році максимальна тривалість бездощових періодів спостерігалась у Криму, а також Херсонській, Миколаївській та Одеській областях – в середньому по 101-108 днів, у Полтаві – 115 днів. А от найменша тривалість бездощових періодів відзначалась на півночі та заході країни – по 23-35 днів (**Рис. 1.1**).

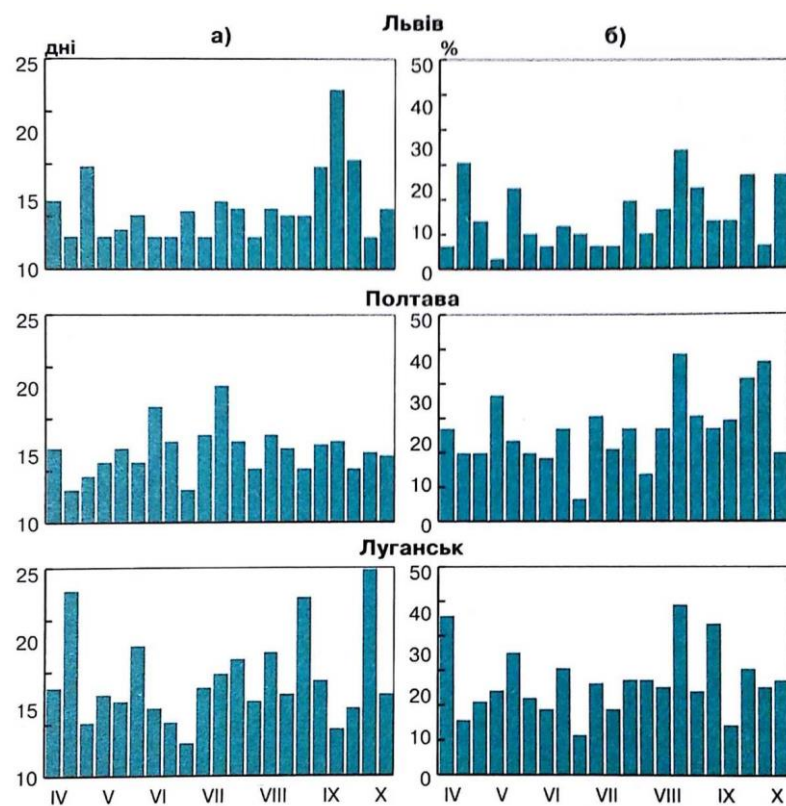


Рис.1.1. Середня тривалість (дні) (а) і повторюваність (%) (б) посушливих періодів віддекади їх початку.

За вегетаційний період найчастіше бездощові періоди спостерігаються в серпні-жовтні, але можуть траплятися і на початку літа. Тривалі осінні бездощові періоди виникають на заході країни, а ще н південному сході на в центрі. А от на решті територій виникають весняні посухи – з березня по травень. На прибережних територіях, а також на півдні Криму найтриваліші

бездошові періоди виникають всередині вегетаційного періоду через розвиток бризової циркуляції [Семенова (2011)].

У період кліматичної норми 1961-1990 рр. середня тривалість бездошових періодів у Степу становила 12-16 днів, на Поліссі та в Лісостепу – 9-11 днів [Ліпінський та ін. (2003)]. Окрім того було встановлено повторюваність даного явища. Так бездошові періоди тривалістю 10-20 днів повторювалися 18-27% по всіх агрокліматичних зонах. З тривалістю 21-30 днів – 4-9%. Повторюваність періодів тривалістю 31-40 днів становить менше 5%. А більш тривалі бездошові періоди мають повторюваність лише 1-2%, а в окремих частинах Степу до 5%.

Під час бездошових періодів спостерігаються підвищені температури повітря [Ліпінський та ін. (2003)]. На заході України у 30% випадків максимальні температури під час тривалих бездошових періодів становили понад $+25^{\circ}\text{C}$, а іноді і вище $+30^{\circ}\text{C}$. На сході країни у 35-45% випадків температура сягала понад $+30^{\circ}\text{C}$. На півдні у 40-50% випадків температура була понад $+30^{\circ}\text{C}$, а понад $+35^{\circ}\text{C}$ – у 3-8% випадків. При цьому іноді відносна вологість повітря знижується до 20%. За бездошових періодів вітри зазвичай слабкі, їхня швидкість не перевищує 5 м/с у різних напрямках. При сильних вітрах у Степу можуть виникати пилові бурі та суховії.

1.2.2. Повторюваність бездошових періодів у поточних кліматичних умовах

Якщо брати до уваги, що бездошовий період є передвісником посухи, то в даній роботі були розглянуті бездошові періоди тривалістю понад 25 днів за літній період (червень-серпень) у 1981-2019 років по 8 станціях степової частини України (Вінниця, Дніпро, Запоріжжя, Кропивницький, Миколаїв, Одеса, Херсон, Черкаси) та м. Сімферополь. Відомості про добові суми опадів, а також решта даних отримані з бази даних сайту НАСА. Отримані дані використовувались у розрахунках, що наведені у 3-4 розділі.

Згідно з отриманими даними, кількість тривалих бездощових періодів коливалася від 1 до 3 за літній сезон.

Аналіз міжрічного ходу сумарної тривалості бездощових періодів показав, що на півдні країни найбільш довгими були періоди в 1998, 1999, 2005, 2011 та 2012 рр. При цьому максимальна повторюваність бездощових періодів не завжди співпадала з максимальною сумарною тривалістю.

Найбільш тривалі бездощові періоди траплялися в південних. Максимальна тривалість є найбільшою в Сімферополі (55 днів) та Одесі (43 дні), на решті території коливається в межах 25-38 днів. Середня максимальна кількість днів у бездощових періодах по станціях України становить 34,6 дні. В Сімферополі та Одесі частка періодів по 25-30 днів становить 22 та 19% відповідно, у решти станцій цей показник є меншим. Бездощові періоди тривалістю 31-40 днів спостерігалися тільки в половині розглянутих станцій України, а тривалістю понад 40 днів - лише в Одесі та Сімферополі.

Одержані результати підтверджують дослідження, які виявили, в цілому, несприятливий вплив кліматичних змін у характері регіональної атмосферної циркуляції на режим опадів в Україні наприкінці ХХ — початку ХХІ століття, внаслідок чого опади стали випадати дуже нерівномірно за рахунок збільшенні дискретності у часі та коливання їх інтенсивності (збільшення у червні та зменшення у серпні), при цьому сумарна кількість опадів в теплий період року майже не змінилася [Тимофеев та ін. (2012)].

РОЗДІЛ 2

КІЛЬКІСНІ ПОКАЗНИКИ ПОСУХ

Найчастіше для опису явища посухи використовують дані про режим опадів, дефіцит вологості повітря, випаровуваність, температуру повітря, радіаційний баланс місцевості тощо. Проте окремі величини не можуть описати це комплексне явище, тому використовують різні коефіцієнти або індекси посух, що враховують температурно-вологісний режим території за певний проміжок часу. Усі існуючі індекси мають і переваги, і недоліки, тому для оцінки посухи варто використовувати одразу кілька показників та порівнювати їх.

Починаючи з 2020-30-х років минулого століття, відбувається розробка та пошук різних показників посух у наукових дослідженнях різних країн. Завдяки цьому з'явилась велика кількість досить вдалих, проте не зовсім зручних для розрахунків та точних індексів. Бучинський І.Є. [Бучинский (1976)] перш за все згадує загальноновживаний для вітчизняної метеорології гідротермічний коефіцієнт Г.Т. Селянінова (так званий ГТК), а також показники зволоженості Костіна С.І. та Несторова В.Г (обидва індекси розраховуються на основі температури повітря та дефіциту вологості в певні строки спостережень), а також показник посушливості Бова Н.В. (залежить від сум температур, кількості опадів та запасів вологи в метровому шарі ґрунту на початку весни), та радіаційний індекс сухості Будико М.І. (розраховується на основі радіаційного балансу зволоженої поверхні). Проте зараз все частіше використовують показники, що розроблені зарубіжними дослідниками та відносяться до різних систем моніторингу посух. Серед них, до прикладу, індекс суворості посух Палмера, вегетаційні супутникові індекси, стандартизовані індекси посух тощо [Хлебникова и др. (2012)].

Системи раннього попередження засухи (СРПЗ), як правило, призначені для відстеження, оцінки та надання відповідної інформації щодо умов і тенденцій кліматичного, гідрологічного та водного постачання. В ідеалі вони мають як компонент моніторингу (включаючи вплив), так і компонент прогнозування. Мета полягає в тому, щоб забезпечити своєчасну інформацію або в ранньому періоді посухи для швидкого реагування (через порогові тригери) у рамках плану управління ризиком засухи як засобу зменшення потенційних впливів. Старанний, інтегрований підхід є життєво важливим для моніторингу такої небезпеки, яка розвивається повільно.

Моніторинг різних аспектів гідрологічного циклу може потребувати різноманітних показників та індексів. Бажано вирівняти ці зображення з впливом виникаючих умов на місцях та прийняти управлінські рішення різними особами, групами та організаціями. Хоча СРПЗ в кінцевому рахунку зазнають впливу, оцінка впливу посухи є великою прогалиною в багатьох СРПЗ, що використовуються в даний час в усьому світі. Розуміння того, як посухи впливають на людей, громади, підприємства чи сектори економіки, є ключем до прийняття заходів для пом'якшення наслідків майбутніх засух [HandbookofDroughtIndicatorsandIndices (2016)].

2.1. Підходи до моніторингу засухи та керування її раннім попередженням та оцінкою

Існує три основні методи моніторингу посухи та керівництва її раннього попередження та оцінки:

1. Використання одного показника або індексу
2. Використання кількох показників або індексів
3. Використання складових або гібридних індикаторів

У минулому фахівці та вчені використовували один показник або індекс, оскільки це було єдине вимірювання, доступне для них, або вони мали обмежений час для отримання даних та обчислення похідних індексів

або інших результатів. Протягом останніх 20 років спостерігається сильний глобальний інтерес та зростання нових індексів на основі різних показників, які підходять для різних застосувань та масштабів, як просторових, так і тимчасових. Ці нові індекси дали вченим більші можливості розрахунків. Поява географічних інформаційних систем та збільшення обчислювальних та диспетчерських можливостей збільшили можливості накладання, картування та порівняння різних показників або індексів.

Плутанина може виникнути при спробі визначити, які показники або індекси використовувати, особливо якщо вони пов'язані з комплексним планом засухи та використовуються як інструмент для здійснення заходів з боротьби з посухою. Це вимагає часу і системи проб і помилок, щоб визначити найбільш підходящий для конкретної місцевості індекс. Протягом останнього десятиліття новий тип комбінованого (інколи - гібридного) показнику з'явився як засіб для об'єднання різних показників та індексів, як зважених, так і ні, або для моделювання. Ідея полягає в тому, щоб використовувати сильні сторони різноманітних входів, але забезпечувати єдине, просте джерело інформації для тих, хто приймає рішення. З огляду на те, що суворість посухи найкраще оцінюється на основі кількох показників, пов'язаних із наявністю води в певній місцевості або регіоні, композитний або гібридний підхід дозволяє збільшити число елементів у процесі оцінки.

Тригери - це конкретні значення показнику або індексу, які ініціюють або припиняють кожний рівень плану посухи та пов'язаних з ним заходів щодо пом'якшення наслідків та управління надзвичайними ситуаціями. Іншими словами, вони ініціюють дію та дозволяють звітувати щодо того, хто що робить коли це потрібно. Це, в кінцевому підсумку, повинно супроводжуватися розробкою комплексного плану щодо боротьби з посухою. Необхідно мати повний перелік тригерів для індексів, які також повинні бути приведені у відповідність з планом дій керівництва скоординованого набору дій окремих відомств і міністерств. Без цього

вирівнювання може спостерігатися значна затримка дій на випадок посухи в певному регіоні чи місцевості.

Так само, як не існує єдиного визначення посухи, не існує єдиного індексу або показника, який може бути використаний для всіх видів посухи, кліматичних режимів та секторів, що постраждали від посухи. Багато факторів залежить від того, який показник, індекс або тригер (або їх комбінація) найкраще використовується для конкретної потреби або застосування.

Найпростіший показник для використання, як правило, один, який вже виробляється в оперативному і вільному доступі, але це не обов'язково означає, що це кращий або найчастіше застосований індекс. Зрештою, вибір має визначатися користувачами на регіональному, національному або місцевому рівнях. Переважним та рекомендованим підходом для користувачів є прийняття кількох композитних чи гібридних індексних підходів як частини СРПЗ у контексті комплексного плану пом'якшення наслідків посухи. В ідеалі це потребує ретельного аналізу та дослідницького підходу, щоб визначити, які показники найкраще працюють в конкретних кліматичних режимах, регіонах, басейнах і місцях. Дослідження також вимагає визначення того, які сезони найбільш релевантні для показників, що відображають вплив на даній місцевості. Після визначення показники можуть бути рекомендовані або застосовані в СРПЗ як потенційні активатори, пов'язані з надзвичайними ситуаціями або заходами з пом'якшення наслідків в рамках програми посухи.

У 2016 році ВМО розробило посібник [Handbook of Drought Indicators and Indices (2016)], у якому представлені всі вживані показники та індекси посушливості. Для кожного індексу вказані ступінь складності розрахунків, країна та історія походження, а також необхідні для розрахунків метеорологічні величини. Окрім того зазначаються сфери застосування, сильні та слабкі сторони кожного показника, а ще – посилання на більш детальний опис.

Класифікація "простота використання" використовує підхід "світлофор" для кожного індексу наступним чином:

1. Показники вважаються зеленими, якщо виконується один або декілька наступних критеріїв:

- Код або програма для запуску індексу легко та вільно доступні
- Щодня дані не потрібні
- Відсутні дані дозволяються
- Випуск індексу вже здійснено операційно і доступний в Інтернеті

2. Індеси вважаються жовтими, якщо виконується один або декілька наступних критеріїв:

- Для розрахунків потрібні декілька змінних або вхідних даних
- Код або програма для запуску індексу недоступні в загальнодоступному домені
- Може знадобитися лише один вхід або змінна, але код не доступний
- Складність розрахунків, необхідних для створення індексу, є мінімальною

3. Індеси вважаються червоними, якщо виконується один або декілька наступних критеріїв:

- Код потрібно було б розробити для розрахунку індексу на основі методології, наведеної в літературі
- Індекс або похідні продукти не є доступними
- Індекс є незрозумілим індексом і не широко використовується, але може застосовуватися
- Індекс містить змодельований вхід або є частиною розрахунків.

2.2. Перелік індексів посухи за рекомендаціями ВМО

Індекс децилів (Deciles Index, DI). Індекс *DI* групує щомісячні кількості опадів на десять категорій [Карєвіна, Костирко, Олійник (2019)]. Кожна з цих категорій названа децилом, перший децил, представляє кількість опадів, що не перевищує 10 % від найменшої кількості опадів; другий децил – не перевищує 20 % від найменшої кількості опадів. Ці децили тривають до тих пір, поки кількість опадів, визначених десятим децилом, не буде найбільшою кількістю опадів у довгостроковій перспективі запису. За визначенням, п'ятий децил є медіаною, а кількість опадів не перевищує 50 % від події протягом періоду запису. Децили згруповані в п'ять класифікацій: найнижчі децили 1-2; потім 3-4; 5-6; 7-8 і найвищі децили 9-10. Індекс надає точне статистичне оцінювання опадів з довгими кліматичними записами, які необхідні для розрахунку *DI*. Переваги: *DI* є корисним показником, у випадку, коли приймається управлінське рішення, стосовно пом'якшення наслідків. Недоліки: для обчислення децилів необхідний довгий кліматологічний запис.

Відсоток від норми опадів (Percent of Normal Precipitation PNI). Це метеорологічний показник, який описує посуху як відхилення опадів від кліматичної норми за референтний період [Карєвіна, Костирко, Олійник (2019)]. Відсоток від норми обчислюється діленням даної кількості опадів на нормовану кількість. Період аналізу може змінюватись від одного місяця до року. Основною перевагою цього індексу є його простота та прозорість, що робить його сприятливим для донесення рівня посухи суспільству. Відсоток від норми дозволяє проводити аналіз для одного регіону та конкретного періоду протягом року. Статистичну конструкцію цього показника критикують за невідповідність, оскільки розподіли за сезонами та регіонами різні, цей показник не може бути використаний для порівняння посухи за сезонами та

регіонами. Цьому методу не вистачає надійності, необхідної для оперативного використання в плануванні та управлінні.

Індекс аномалії опадів (RainfallAnomalyIndex RAI). Індекс аномалії опадів заснований на обчисленнях опадів [Каревіна, Костирко, Олійник (2019)], які являються єдиним ефективним фактором цього показника. *RAI* має певну гнучкість, оскільки застосовується в різних масштабах часу (місяць, рік), він використовує нормовані значення опадів на основі історії відповідної метеорологічної станції. Переваги: простий розрахунок, за допомогою одного входу (опаді). Недоліки: розраховується на основі повного набору даних. Дані місячних опадів (P) порівнюються з середньорічним значенням (\bar{P}), якщо $P > \bar{P}$, то *RAI* задається наступним рівнянням:

$$RAI = 3 \left[\frac{P - \bar{P}}{\bar{m} - \bar{P}} \right] \quad (2.1)$$

Якщо $P < \bar{P}$, то *RAI* задається:

$$RAI = -3 \left[\frac{P - \bar{P}}{\bar{X} - \bar{P}} \right] \quad (2.2)$$

Стандартизований індекс опадів (StandardizedPrecipitationIndexSPI). Даний індекс розробили та запровадили з метою виявлення та моніторингу посухи, використовуючи дані щомісячних опадів [Каревіна, Костирко, Олійник (2019)]. Він призначений для визначення періодів посухи, а також суворості посухи на різних масштабах часу, таких як 1, 3, 6, 9 та 12 місяців. Однак об'єктивний вибір найкращого кроку за часом залежить від мети аналізу посухи. Як повідомляє Всесвітня метеорологічна організація, *SPI* базується на ймовірності опадів за будь-який часовий період. Переваги: єдиний вхідний параметр – опади; обчислюється для різних періодів часу; надає інформацію про раннє попередження і може бути використаний для оцінки тяжкості посухи; доступна повна процедура оцінки *SP*. Недоліки: для обчислення *SPI* необхідно

використовувати неперервні довгострокові дані.

Індекс вологості (Aridity Index AI). *AI* – це найпростіший показник посушливості, заснований виключно на опадах [Карєвіна, Костирко, Олійник (2019)]. Загальноприйнятим визначенням на основі опадів є те, що посушливий регіон отримує менше 250 мм опадів на рік. Цей критерій посушливості використовувався Міжурядовою групою з питань зміни клімату. посушливості (*AI*) визначається на основі співвідношення щорічних опадів (*P*) до швидкості потенційного випаровування (*ET_p*), наступним чином:

$$AI = \frac{P}{ET_p} \quad (2.3)$$

Теплі посушливі райони мають низький рівень *P*, високий *ET_p* і дуже низькі значення *AI*.

Гідротермічний коефіцієнт Селянінова (Hydro-thermal Coefficient of Selyaninov HTС).

Цей коефіцієнт зволоження який визначається відношенням суми опадів до 0.1 суми температур за період часу з температурою вище за 10°C [Карєвіна, Костирко, Олійник (2019)]. *HTС* має певні переваги – характеризує не тільки прибуткову частину водного балансу (опадів), а й непродуктивну витрату вологи (випаровуваність). *HTС* є достовірним показником зволоження в тих районах, для яких характерний однорідний тип річного ходу опадів. Окрім того, він об'єктивний і працює в достатньо широкому діапазоні температур та опадів.

Індекс посушливості Педя (Ped Index). Індекс посушливості використовується для визначення посухи Гідрометеорологічним центром Росії [Карєвіна, Костирко, Олійник (2019)]. Перевагою цього показника є те, що він легко класифікує погодні умови (посушлива чи волога погода). Для розрахунку індексу *Ped*, використовується наступна формула:

$$Ped = \frac{\Delta T}{\sigma_T} - \frac{\Delta P}{\sigma_P} \quad (2.4)$$

де P – загальна річна кількість опадів (мм); P_i – середньомісячна кількість опадів в 1-ому місяці (мм); T – середньомісячна температура повітря ($^{\circ}\text{C}$); ΔT – відхилення температури ($^{\circ}\text{C}$); ΔP – відхилення опадів (мм); σ_T – стандартне відхилення температури ($^{\circ}\text{C}$); σ_P – стандартне відхилення опадів (мм). P_{ed} індекс залежить від зміни температури та опадів. Позитивні значення індексу відповідають сухій погоді або більш теплому температурному режиму, тоді як негативні значення P_{ed} – вологій погоді.

Стандартизований індекс евапотранспірації і опадів (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index SPEI). SPEI заснований на записах опадів і температури [Карєвіна, Костирко, Олійник (2019)], його перевага в можливості включення впливу мінливості температури на оцінку посухи. Процедура обчислення індексу є детальною і включає кліматичний водний баланс, накопичення дефіциту/надлишку в різні часові масштаби та пристосування до логістично-логістичного розподілу ймовірностей. Розрахунок *SPEI* аналогічний стандартизованому індексу опадів (*SPI*), але він включає ще температуру. Для обчислення використовуються щомісячні (або щотижневі) опади в якості вхідних даних. *SPEI* використовує щомісячну (або щотижневу) різницю між опадами та *PET* (Потенційна евапотранспірація – кількість води, яка могла б виділитися шляхом евапотранспірації при певному режимі температури і вологості, виражається в мм водяного стовпа). Перший крок, розрахунок *PET*, важкий через залучення численних параметрів, включаючи температуру поверхні, вологість повітря, надходження випромінювання, тиск водяної пари тощо. Показник посухи, *SPEI* використовує основу *SPI*, але включає температурну складову, що дозволяє індексу враховувати вплив температури на розвиток посухи за допомогою базового розрахунку водного балансу. *SPEI* має шкалу інтенсивності, в якій обчислюються як позитивні, так і негативні значення, ідентифікуючи вологі та сухі події. Він може бути розрахований на масштабах часу від 1 місяця до 48 місяців і більше. Вхідні параметри: щомісячні дані опадів та температури. Переваги: включення температури

разом із даними про опади, що дозволяє *SPEI* враховувати вплив температури на ситуацію із посухою; застосовується для всіх кліматичних режимів; результати є порівняльними, оскільки вони стандартизовані; *SPEI* ідеальний показник при розгляді впливу зміни клімату на вихідні моделі різних майбутніх сценаріях. Недоліки: вимога до серійно повного набору даних як для температури, так і для опадів; *SPEI* щомісячний індекс, тому він не в змозі бути швидко визначеним, коли ситуації із посухою стрімко розвивається.

Індекс Палмера. У 1965 В. Палмер увів індекс для визначення аномально сухих метеорологічних умов, або аномально вологим періодам на тривалих проміжках часу [Palmer (1965)]. Для обчислення даного показника використовують спрощене рівняння водного балансу, тобто необхідними є дані про температуру повітря, опади, а також вологоємність ґрунту.

Розрахунок \hat{P} здійснюється, як зазначалось [Карєвіна, Костирко, Олійник (2019)], за спрощеним рівнянням водного балансу, яке описує потенційні для умов даного місяця притоки-відтоки вологи в ґрунті

$$\hat{P} = ET + R + RQ - L(2.5)$$

де L — втрати ґрунтової вологи;

ET — евапотранспірація;

R — чистий приток вологи в ґрунті;

RQ — стік вологи.

Палмер використав двошарову модель для обчислення вологості ґрунту, при цьому були введені деякі припущення щодо властивостей ґрунту утримувати воду та передавати її між. До того ж, обрані два шари ґрунту не завжди можуть точно відповідати конкретній місцевості [Alley (1984)].

2.3 Випадкові процеси.

Випадкові процеси є математичними моделями для опису випадкових стихійних метеорологічних явищ, що розвиваються в часі. При цьому

передбачається, що стан на поточний момент часу є випадковою величиною. Випадковий процес $\xi(t)$ - випадкові величини, що визначені в імовірнісному просторі. Випадковий процес можна розглядати як сукупність випадкових величин, що залежать від параметра t (час).

Закони розподілу випадкового процесу. Універсальною, вичерпною характеристикою випадкової величини є її функція розподілу

$$F(x) = P(\xi < x) \quad (2.6)$$

При будь-якому фіксованому t отримаємо переріз випадкового процесу. Це випадкова величина, яка має закон розподілу.

У випадку *одновимірного закону розподілу*:

$$F(x, t) = P(\xi(t) < x) \quad (2.7)$$

Тобто, функція залежить від двох аргументів t, x .

Якщо емпіричний закон розподілу апроксимується нормальним (гаусовим) законом, то функція щільності розподілу ймовірності для одновимірного закону Гауса розподілу випадкових величин записується в наступному вигляді:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2}\right] \quad (2.8)$$

де x - одновимірна випадкова величина, μ_x - її математичне сподівання, σ_x - середнє квадратичне відхилення, $\sigma_x^2 = D$ - дисперсія.

Імовірність приналежності випадкової величини діапазону $\alpha < x < \beta$ обчислюється таким чином:

$$p(\alpha < x < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha}^{\beta} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2}\right] dx \quad (2.9)$$

Якщо нормалізувати і центрувати значення розсіювання x , тобто прийняти нову змінну $\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}} = \tau$, то отримаємо:

$$p(\alpha < x < \beta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{\alpha-\mu}{\sigma\sqrt{2}}}^{\frac{\beta-\mu}{\sigma\sqrt{2}}} e^{-\tau^2} d\tau \quad (2.10)$$

У випадку, якщо покласти $\mu = \alpha$, а $z = \frac{\beta - \mu}{\sigma\sqrt{2}}$, то отримаємо табличний інтеграл ймовірності:

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\tau^2} d\tau \quad (2.11)$$

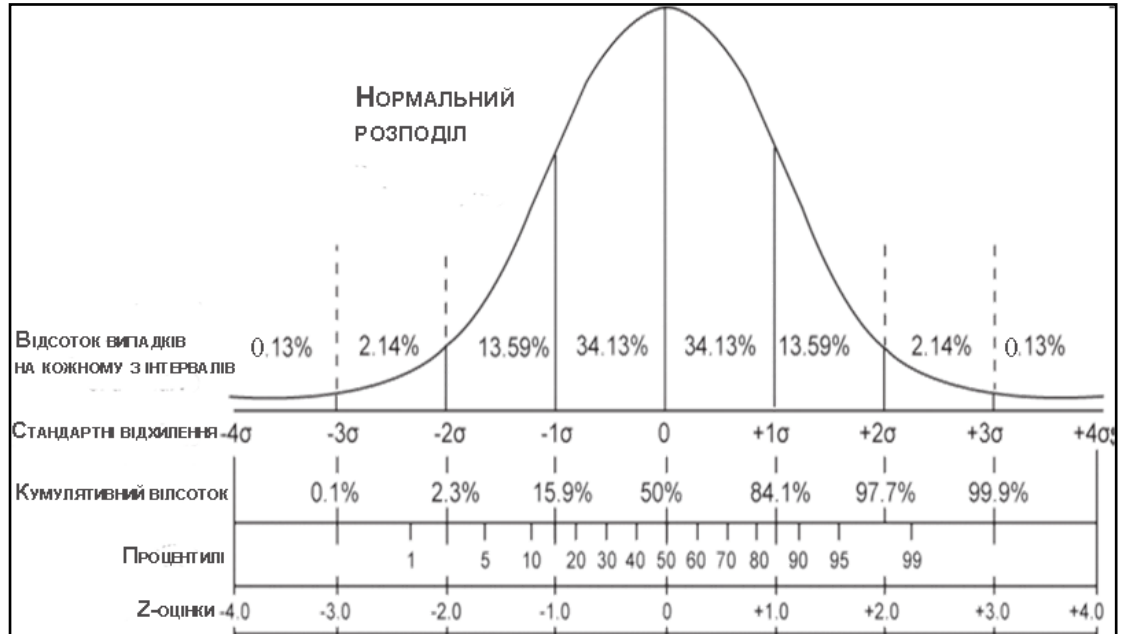


Рис.2.1. Нормальний закон розподілу щільності ймовірності випадкового одновимірного розсіювання.

Нормальний закон пояснює розподіл щільності ймовірностей для ідеального випадкового процесу, викликаного випадковими предикторами. Цей закон дає змогу апроксимувати емпіричний розподіл переважної більшості випадкових метеорологічних величин, який відображає ймовірність даної величини. Це в свою чергу є важливим при класифікації клімату, адже повторюваність метеорологічних величин є однією з основних критеріїв, на основі якого виявляють особливості регіонального клімату та внутрішні взаємозв'язки.

Багатовимірний нормальний розподіл (або також розподіл Гауса) використовують як узагальнення одновимірного гаусівського розподілу для кількох вимірів. Вектор випадкових величин має k -варіативний розподіл Гауса при лінійній комбінації його k компонент, що мають одновимірний нормальний розподіл. Важливість цього розподілу підтверджується узагальненням центральної граничної теореми для кількох вимірів.

Багатовимірний гаусів розподіл використовують для опису будь-яких множин іноді корельованих випадкових величин із дійсними значенням, кожна з яких групується навколо середнього значення.

Багатовимірний нормальний розподіл k -вимірному вектору випадкових величин $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_k]^T$ має багатомірний нормальний розподіл, якщо виконується одна з умов:

- якщо довільна лінійна комбінація компонентів вектору має нормальний розподіл або є сталою;
- існує вектор незалежних стандартних нормальних випадкових величин $\mathbf{Z} = [Z_1, Z_2, \dots, Z_m]^T$, дійсний вектор $\boldsymbol{\mu} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n]^T$ і матриця \mathbf{A} розмірності $m \times n$, такі що: $\mathbf{X} = \mathbf{AZ} + \boldsymbol{\mu}$.

Основні властивості:

- якщо вектор $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_k]^T$ має багатовимірний гаусів розподіл, то його компоненти X_i , ($i=1, \dots, k$) мають одновимірний розподіл Гауса. Зворотне невірно;
- якщо випадкові величини X_1, X_2, \dots, X_k мають одновимірний нормальний розподіл і спільно незалежні, то випадковий вектор $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_k]^T$ має багатомірний гаусів розподіл. Матриця коваріацій такого вектору є діагональною;
- якщо $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_k]^T$ має багатовимірний гаусів розподіл, і його компоненти попарно некорельовані, то вони незалежні. Проте як тільки компоненти X_1, X_2, \dots, X_k мають одновимірний розподіл Гауса і попарно не корелюють, то звідси не випливає, що вони незалежні.

Багатовимірний гаусів розподіл є не виродженим коли його симетрична матриця коваріацій $\boldsymbol{\Sigma}$ є додатньо означеною. Тоді функція щільності розподілу має вигляд:

$$f(x_1; x_2; \dots x_k) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^k |\boldsymbol{\Sigma}|}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu}) \right] \quad (2.12)$$

де X – вектор-стовпчик дійсних чисел; $|\Sigma|$ – детермінант коваріаційної матриці Σ .

Для двовимірного випадку ($k=2$), функція густини імовірності для вектору $[XY]$ має вигляд:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}} \exp \left[-\frac{1}{2(1-r^2)} \left[\frac{(x-\mu_X)^2}{\sigma_x^2} - 2r \frac{(x-\mu_X)(y-\mu_Y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-\mu_Y)^2}{\sigma_y^2} \right] \right] \quad (2.13)$$

де r – коефіцієнт кореляції між X та Y ; $\sigma_x > 0$; $\sigma_y > 0$.

Тоді

$$\mu = \begin{pmatrix} \mu_X \\ \mu_Y \end{pmatrix}; \Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & r\sigma_x\sigma_y \\ r\sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 \end{pmatrix}. \quad (2.14)$$

Або у векторно-матричній формі:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\Delta}} e^{-\frac{1}{2}X^TK^{-1}X} \quad (2.15)$$

де X – двовимірний вектор центрованих відхилень величин x, y ; K – коваріаційна матриця; K^{-1} – зворотня матриця; $\Delta = \sigma_x^2\sigma_y^2(1-r^2)$.

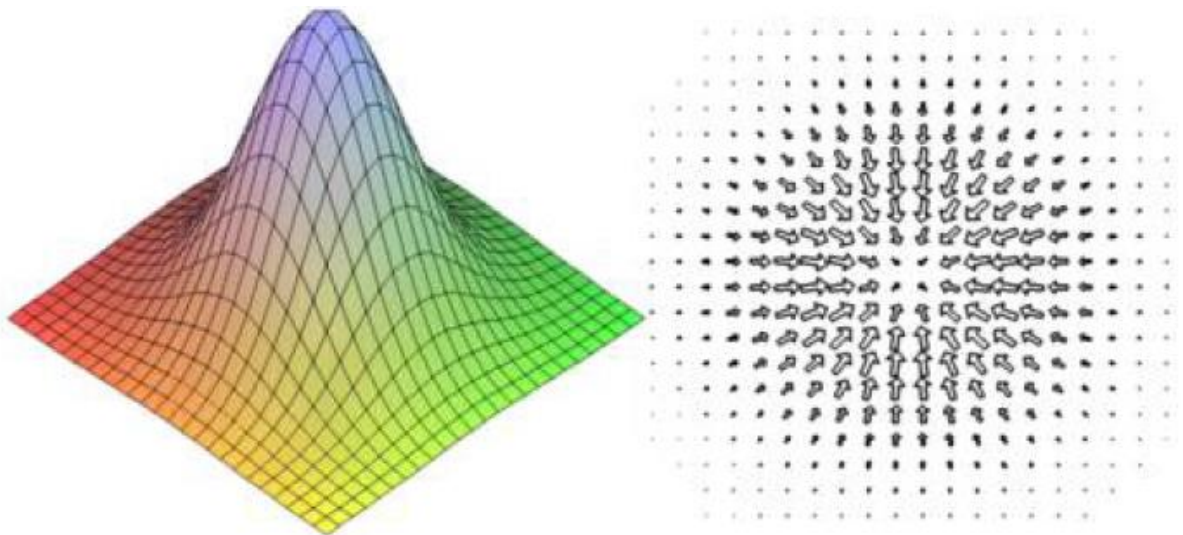


Рис. 2.2. Щільність двовимірного нормального розподілу.

Коваріаційна матриця являє собою симетричну матрицю других моментів функції $f(x, y)$. При цьому, головні моменти функції $f(x, y)$ рівні діагональним дисперсіям компонентів випадкового вектора, а недіагональні

елементи матриці, рівні перехресному другому моменту k_{xy} , в їх вираженні через діагональні елементи матриці однозначно визначають величину і знак отриманого множника узгодження - згаданого коефіцієнта кореляції r :

$$K = \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{xy} & k_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{xx} & r\sqrt{k_{xx}\sqrt{k_{yy}}} \\ r\sqrt{k_{xx}\sqrt{k_{yy}}} & k_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y r \\ \sigma_x\sigma_y r & \sigma_y^2 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Визначник коваріаційної матриці дорівнює $\Delta = \sigma_x^2 \sigma_y^2 (1 - r^2)$, звідси вираз для оберненої матриці квадратичної форми, що стоїть в показнику експоненти нормального закону щільності ймовірності зосереджених випадкових величин x і y :

$$K^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \sigma_y^2 & -r\sigma_x\sigma_y \\ -r\sigma_x\sigma_y & \sigma_x^2 \end{pmatrix} = \frac{1}{1-r^2} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_x^2} & -\frac{r}{\sigma_x\sigma_y} \\ -\frac{r}{\sigma_x\sigma_y} & \frac{1}{\sigma_y^2} \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

При $0 \leq r \leq 1$ вираз $X^T K^{-1} X = \lambda^2 = \text{const} > 0$ є позитивно визначена квадратична форма для векторів X . Тому відповідно теорії кривих другого порядку рівняння сталості функції $f(x, y)$:

$$\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2(1-r^2)} - \frac{2r(x-\mu_x)(y-\mu_y)}{\sigma_x\sigma_y(1-r^2)} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2(1-r^2)} = \lambda^2 \quad (2.18)$$

Для тривимірного випадку ($k=3$), функція густини ймовірності для вектору $[XYZ]$ є наступною:

$$f(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \sqrt{1 + 2r_{xy}r_{xz}r_{yz} - r_{xy}^2 - r_{xz}^2 - r_{yz}^2}} \times$$

$$\exp \left\{ -\frac{1}{2(1 + 2r_{xy}r_{xz}r_{yz} - r_{xy}^2 - r_{xz}^2 - r_{yz}^2)} \left[\frac{(x - \mu_x)^2 (1 - r_{yz}^2)}{\sigma_x^2} + \frac{(y - \mu_y)^2 (1 - r_{xz}^2)}{\sigma_y^2} + \right. \right.$$

$$\left. \frac{(z - \mu_z)^2 (1 - r_{xy}^2)}{\sigma_z^2} + \frac{2(x - \mu_x)(y - \mu_y)(r_{xz}r_{yz} - r_{xy})}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{2(x - \mu_x)(z - \mu_z)(r_{xy}r_{yz} - r_{xz})}{\sigma_x \sigma_z} + \right.$$

$$\left. \frac{2(y - \mu_y)(z - \mu_z)(r_{xy}r_{xz} - r_{yz})}{\sigma_y \sigma_z} \right] \} \quad (2.19)$$

Важливою властивістю лінійного перетворення багатомірної випадкової величини [Платонов (2013)] є збереження після перетворення властивості ортогональності власних векторів, що визначають положення головних осей еліпсів ймовірності. При цьому зберігаються і геометричні властивості функції Гауса щільності розподілу ймовірностей. Тобто, при лінійних перетвореннях багатовимірних випадкових векторів еліпсоїди їх розсіювання перетворюються в інші еліпсоїди. Використання геометричних властивостей еліпсоїдів дозволяє досить просто визначати потрібні способи необхідних перетворень ймовірностей, і навпаки - відомі властивості нормального розподілу ймовірностей дозволяють уточнювати геометричні властивості перетворюваних еліпсоїдів. За аналогією з двовимірним випадком легко уявити, що в тривимірному декартово-координатному просторі еліпсоїди рівної щільності нормального закону розподілу ймовірностей вписані в багатовимірний координатний паралелепіпед, утворений гіперплощинами, що є ортогональними осям координат. Розміри цього прямокутного координатного «ящика» уздовж кожної з осей координат пропорційні розмірам одновимірних середньоквадратичних відхилень $\pm\sigma_i$ ($i = 1, 2, 3$; тобто тривимірна розмірність «хмари» випадкового вектору) найбільшого розсіювання уздовж кожної з координатних осей. Цей розмір безумовного σ -відхилення від центру еліпсоїда уздовж обраної координатної осі відповідає припущенням про реалізацію будь-яких можливих значень

відхилень інших компонент випадкового вектору, обмежених ймовірністю бути всередині еліпсоїда з розмірами, що відповідають обраному значенню щільності ймовірності. Проекції еліпсоїда розсіювання багатовимірної випадкової величини в тривимірному координатному просторі утворюють тривимірні еліпсоїди нормального розподілу ймовірностей розсіювання обраних трійок координат.

Для *тривимірного випадку* ($k=3$) рівняння сталості функції $f(x,y,z)$:

$$\lambda^2 = \left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma_x}\right)^2 (1 - r_{yz})^2 + \left(\frac{y-\bar{y}}{\sigma_y}\right)^2 (1 - r_{xz})^2 + \left(\frac{z-\bar{z}}{\sigma_z}\right)^2 (1 - r_{xy})^2 + \frac{2(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sigma_x\sigma_y} (r_{xz} \cdot r_{yz} - r_{xy}) + \frac{2(x-\bar{x})(z-\bar{z})}{\sigma_x\sigma_z} (r_{xy} \cdot r_{yz} - r_{xz}) + \frac{2(y-\bar{y})(z-\bar{z})}{\sigma_y\sigma_z} (r_{xz} \cdot r_{xy} - r_{yz}) \quad (2.20)$$

Ймовірність попадання в еліпс розсіювання. Ймовірність попадання випадкової точки в довільну область D можна обчислити шляхом інтегруванням щільності розподілу по цій області (2.19) [Двумерноенормальноераспределение, 2016]. Для еліпсоїда розсіювання B_λ , інтегрування можна вести по шарах рівної щільності B_r ($0 < r \leq \lambda$), причому заміною змінних $u_i = \xi_i / \sigma_i$ ($i = 1, 2, 3$) ці шари перетворюються в сфери $C_r = \{u_1, u_2, u_3 : u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 < r^2\}$ (рис.2.6).

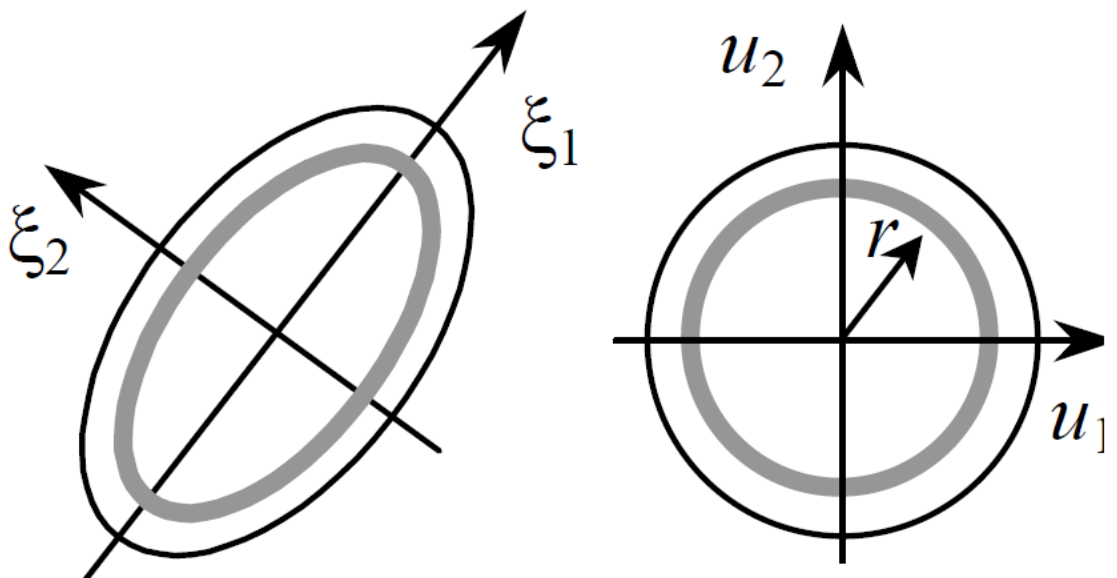


Рис. 2.6. Перехід до інтегрування по концентричним сферам

Щільність ймовірності на Cr з урахуванням зміни масштабів змінних набуває вигляду $f(r) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{r^2}{2}}$, ймовірність попадання в шар $dP(r, dr)$ пропорційна $r^2 \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right)$, а сумарна ймовірність виражається інтегралом: а ймовірність попадання в Bk можна отримати інтегруванням по шарам:

$$P_{\lambda;3} = C \int_0^\lambda e^{-\frac{r^2}{2}} r^2 dr \quad (2.21)$$

де C - стала. Так як, при $\lambda \rightarrow \infty$ $P_{\infty;3} = 1$, значення C повинне бути зворотною величиною до інтеграла з нескінченним верхньою межею. Інтеграл в (2.21) виражається через неповну гамма-функцію:

$$\int_0^\lambda e^{-\frac{r^2}{2}} r^2 dr = \left| \begin{array}{l} t = \frac{r^2}{2} \\ r = \sqrt{2t} \\ dt = \frac{1}{\sqrt{2t}} dt \end{array} \right| = \int_0^{\frac{\lambda^2}{2}} e^{-t} t^{\frac{1}{2}} dt = \gamma\left(\frac{3}{2}, \frac{\lambda^2}{2}\right) \quad (2.22)$$

а константа C - через гамма-функцію: $C=1/\Gamma(3/2)$. Ймовірність попадання в тривимірний еліпсоїд можна обчислити за формулою:

$$P_{\lambda;3} = \frac{\gamma\left(\frac{3}{2}, \frac{\lambda^2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{3}{2}\right)} \quad (2.23)$$

Де $\Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$ - Гама - функція;

$\gamma\left(\frac{3}{2}, \frac{k^2}{2}\right)$ - неповна Гама-функція (нижня), яка розраховується

шляхом інтегрування, в даному випадку

$$\gamma\left(\frac{3}{2}, \frac{k^2}{2}\right) = \int_0^{\frac{k^2}{2}} t^{\frac{1}{2}} e^{-t} dt \quad (2.24)$$

$$\text{Де } k^2 = \left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y-\bar{y}}{\sigma_y}\right)^2 + \left(\frac{z-\bar{z}}{\sigma_z}\right)^2.$$

Для суховіїв використовують цю ж формулу, проте з величинами температура повітря, швидкість вітру та відносна вологість повітря.

РОЗДІЛ 3

Статистичне моделювання температурно-вологісного режиму

3.1. Індексація метеорологічної посухи

Розрахунок індексів посухи передбачає дослідження впродовж референтного періоду [Карєвіна, Костирко, Олійник (2019)]. У зв'язку з цим необхідно було визначитися відносно якого періоду розглядати кліматичні аномалії сьогодення. Аналіз індексів посухи за референтні періоди 1961-1990 рр.; 1971-2000 рр. та 1981-2010 рр. для календарного літа показав, що індекси, зокрема, *AI*, *SPI* та *SPEI* практично не змінюються і знаходяться в середині рівня прояву – норма. У зв'язку з цим було прийнято рішення проводити дослідження аномалій сучасного клімату відносно референтного періоду 1981-2010 рр. Для кожного літнього місяця проведено розрахунок вищезазначених індексів посухи (Додаток А). У першому десятиріччі референтного періоду помітна посуха спостерігалася лише в серпні 1984 року; в другому десятиріччі двічі – у червні 1992 та 1999 року. Починаючи з 1999 року до кінця референтного періоду посушливість літніх місяців суттєво зросла, спостерігається стійка тенденція до зростання частоти цієї події. Класифікація посухи за інтенсивністю прояву, як аномалія клімату, поводитися на основі шкали, що запропонована авторами досліджуваних індексів посухи. Оскільки шкали для різних індексів мають незначні відмінності в деталізації опису події, тому було вирішено запропонувати дещо грубішу універсальну шкалу оцінки посухи, яка б задовольняла всі індекси посухи (табл. 3.1). У хронологічному порядку, відповідно до шкали інтенсивності прояву посухи (табл. 3.1), виділені посушливі місяці календарного літа, що представлені в табл. 3.2.

Таблиця 3.1

Класифікація інтенсивності посухи

Рівень прояву		PNI, %	RAI	AI	Ped	HTC	SPI	SPEI	DI
Екстремальна посуха	Е	<20	>- 3	<0.03	>3	<0.4	< -2.0	<-2.0	< 1
Сильна посуха	С	20- 39	-1,5/ - 3.0	0.03- 0.19	2- 2,99	0.40- 0.49	-1.50/ - 1.99	-1.50 /- 1.99	1-2
Помірна посуха	П	40- 79	-0.5 / -1.5	0.20- 0.49	1- 1,99	0.50- 0.69	-1.00/ - 1.49	-1.00/- 1.49	3-4
Норма	Н	80- 119	0.5/- 0.5	0.50- 0.65	0/ - 0.99	0.70- 1.29	-0.99/ 0.99	- 0.99/0.99	5-6
Помірно зволожений	ПЗ	120- 159	0.5/1.5		-1/ - 1.99	1.30- 1.69	1.00/1.49	1.00/1.49	7-8
Сильно зволожений	СЗ	160- 180	1.5/3.0		-2/ - 2.99	1.7- 2.0	1.50/1.99	1.50/1.99	9- 10
Екстремальний зволожений	ЕЗ	>180	>3		<-3	>2	> 2.0	>2.0	>10

Реакція індексів посухи виявилася нетривіальною. Аналіз первинних даних (приземна максимальна, мінімальна температура повітря та опади) дозволив інтерпретувати рангові оцінки посухи. Встановлено, що посухи в липні 2001 та 2002 року виявилися екстремальними, згідно з індикаторними оцінками, для яких показники посушливості за всіма індикаторами однакові. При цьому кількість опадів за вказаний період складала відповідно < 10 % та < 20 % від норми, а перевищення максимальної температури, відповідно на +4.7 та +4.1 °С. Таким чином, зміна в місячних сумах опадів на рівні 10 % не вплинула на рівень прояву інтенсивності події. Третя за рангом посуха (червень 2004 р.), з метеорологічними показниками: опади < 10% від норми; температурне перевищення, відповідно – 0.9 °С, отримала практично ті ж самі індикаторні оцінки, виключенням виявив лише індекс *Ped*, що вірогідно обумовлено низькою температурою, яка не перевищила норму. Індекси посушливості для червня 2010 року, виявилися помітно нижчими (*AI*,

PNI, SPI та DI), що пов'язано з опадами, оскільки для вказаного періоду сума місячних опадів складала вже 30% від норми, а відмічені індекси визначаються лише записами опадів (окрім *AI*). Достатньо посушливим виявився серпень 1984 та 2001 року, половина індексів оцінила цю подію як екстремальну. Для всіх інших посушливих місяців календарного літа референтного періоду індикаторні оцінки помітно нижчі. Аналіз оцінок посушливості сучасного періоду вказує на зростання (удвічі) частоти цієї події відносно референтного періоду. Екстремальний рівень посухи відмічений в липні 2014, 2016 та 2017 року. Екстремально посухасучасного періоду (липень 2016 р.) отримала ті ж індикаторні оцінки, що й екстремальні посухи референтного періоду. Оскільки метою даного дослідження є пошук найбільш адаптованих до місцевого клімату індексів посухи, то для її реалізації ефективним виявився порівняльний аналіз вибірок якісних показників інтенсивності посухи, що виникали у часовому масштабі місяць (календарне літо) в досліджуваній референтній період на фіксованій території (**табл. 3.2**).

Таблиця 3.2

Інтенсивність посухи місяця календарного літа у період 1981-2017 рр. (м. Київ)

Рік	Місяць	Індекс метеорологічної посухи								Ранг посухи
		AI-1	PNI-1	SPI-1	SPEI-1	HTC-1	Ped-1	DI-1	RAI-1	
		Референтний період								
1984	Серпень	С	Е	Е	П	Е	П	С	Е	5-6
1992	Червень	П	С	П	П	С	П	С	Е	13
1999	Червень	П	П	П	П	Н	С	С	С	14-15
2000	Серпень	С	С	П	П	С	С	С	Е	10-11
2001	Липень	С	Е	Е	С	Е	Е	Е	Е	1-2
2001	Серпень	С	С	П	П	Е	Е	Е	Е	5-6
2002	Липень	С	Е	Е	С	Е	Е	Е	Е	1-2
2003	Червень	П	С	С	П	Е	П	Е	Е	9
2004	Червень	С	Е	Е	Е	Е	П	Е	Е	3
2005	Липень	П	П	П	П	Е	С	Е	Е	10-11
2008	Серпень	С	П	Н	П	Е	Е	С	С	12
2009	Липень	П	П	Н	Н	П	С	С	Е	14-15
2009	Серпень	С	С	П	П	Е	С	Е	Е	7-8
2010	Червень	П	С	С	Е	Е	Е	С	Е	4
2010	Серпень	С	С	Н	С	Е	Е	С	Е	7-8
Сучасний період										
2013	Серпень	С	С	П	Н	Е	П	С	Е	5
2014	Червень	С	С	П	П	П	П	С	Е	6
2014	Липень	С	С	Е	П	Е	С	Е	Е	3
2015	Червень	Н	С	П	Н	П	С	С	Е	7
2016	Липень	С	Е	Е	С	Е	Е	Е	Е	1
2016	Серпень	С	С	С	П	Е	С	Е	Е	4
2017	Липень	С	Е	Е	С	Е	С	Е	Е	2

Необхідно зазначити, що індекс RAI, який будується лише на записах опадів, виявився неефективним, оскільки 90% посушливих місяців календарного літа віноцінив як екстремальну подію. З тих же міркувань можна визнати неефективним індекс HTC, які

відповідно 75 % досліджуваного посушливого масиву оцінив також, як екстремальну подію. У даному випадку можна твердити про недостатню чутливість цих індексів до інтенсивності посухи. У свою чергу, індекс AI жодного разу не зафіксував екстремальний рівень посухи, він продемонстрував слабку чутливість. Індекс SPEI лише 10 % посушливих літніх місяців оцінив як екстремальну подію. Всі інші індекси (DI, PNI; SPI; Ped) приблизно однаково оцінили екстремальну посушливість. Подібне дослідження ефективності індикаторів посухи було проведено для часового масштабу – календарне літо (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Інтенсивність посухи календарного літа у період 1981-2017 рр. (м. Київ)

Рік	Індекси метеорологічної посухи							Ранг
	PNI-3	SPI-3	SPEI-3	HTC-3	Ped-3	DI-3	RAI-3	
Референтний період								
1981	Н	Н	Н	Н	П	П	П	8
1983	П	П	Н	Н	П	Е	Е	4
1987	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	13-16
1990	Н	Н	Н	Н	Н	П	П	9-10
1991	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	13-16
1992	П	Н	Н	П	П	Е	Е	3
1995	Н	Н	Н	Н	Н	П	П	9-10
1996	Н	Н	Н	Н	Н	П	С	7
1997	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	13-16
1998	Н	Н	Н	Н	Н	П	Н	11-12
2000	П	Н	Н	Н	Н	С	С	5
2001	Н	Н	Н	Н	С	С	С	6
2003	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	13-16
2008	Н	Н	Н	Н	Н	П	Н	11-12
2009	П	С	С	П	Е	Е	Е	1
2010	П	П	С	П	Е	С	Е	2
Сучасний період								
2013	Н	Н	Н	Н	П	П	С	5
2014	П	Е	С	С	Е	Е	Е	1
2015	П	Н	П	Н	С	С	Е	4
2016	П	П	П	П	Е	Е	Е	2
2017	П	С	С	П	С	Е	Е	3

Коли кліматична ситуація посухо-вологого режиму близька до нормальної, практично всі індекси одностаійно фіксують (1987; 1990; 1991; 1995; 1997; 1998; 2003 та 2008 рр.). Проте із зростанням посушливості виникають розбіжності в індикаторних оцінках (1992; 2009 та 2010 рр.). Календарне літо 2009 року, згідно з отриманими значеннями індексів посухи, виявилось найбільш посушливим – *Ped*, *DI* та *RAI* оцінили його як екстремальна посуха; *SPI* та *SPEI* як сильна посуха; *PNI* та *HTC* як помірна. Порівнюючи індикаторні оцінки різного часового масштабу (табл. 3.2; табл. 3.3) необхідно зазначити, що індекси *PNI* та *HTC* суттєво втратили чутливість із зростанням масштабу часу. Неefективність індексу *RAI* збереглася і для цього часового вікна, особливо за сучасний період, це екстремальне оцінювання посухи. Значно краще проявив себе індекс *DI*, не втратили чутливості в оцінюванні інтенсивності посухи *SPI*, *SPEI* та *Ped*. Для встановлення тісноти статистичного зв'язку між індексами посухи застосовувалися методи непараметричної статистики, зокрема, коефіцієнт кореляції та у Кандела, оскільки малий об'єм вибірки не дозволяє емпіричний закон розподілу значень індексів посухи апроксимувати нормальним законом. Результати кореляційного аналізу індексів посухи, які побудовані лише на записах опадів, вказали на високий коефіцієнт кореляції цих індексів між собою (0,8-0,9), це дає підстави залишити в цьому блоці тільки *DI* та *SPI*, враховуючи втрату чутливості *PNI* при оцінці інтенсивності посухи в масштабі календарне літо. Аналогічно був проведений аналіз для індексів посухи, що будуються на записах опадів та температури. Кореляція між індексами цього блоку виявилася дещо нижчою (0,7-0,8), проте достатньо високою. З врахуванням критики, яку зазнали індекси *HTC* та *AI*, була побудована кореляційна матриця для ефективних індексів, що залишилися у різних блоках (табл. 3.4), яка дає підстави стверджувати про рівну зваженість індексів *DI*, *SPI*, *Ped* та *SPEI* особливо на масштабі місяць.

Таблиця 3.4

Кореляційна матриця

Kendall Tau Correlations Ефективні індекси посухи Виділені кореляції є значущими при $p < 0,050$					
Індекси посухи	SPEI-3	Ped-3	Індекси посухи	SPEI-1	Ped-1
DI-3	0,74	-0,59	DI-1	0,6	-0,48
SPI-3	0,82	-0,58	SPI-1	0,61	-0,44

3.2. Статистичний прогноз режиму зволоження

Клімат України в певній мірі уособлює характерні риси глобального клімату. Для виявлення змін у режимі зволоження в останні роки ХХ ст. та на початку ХХІ, які виявилися найтеплішими за весь період спостережень, проведено порівняння середньої місячної та річної кількості опадів за цей період з кліматичною стандартною нормою (1981-2010рр.). Встановлено, що за 1991-2010рр. в холодне півріччя кількість опадів значно зменшилася, особливо в грудні та січні, що становило 70-75% від кліматичної норми. В літній сезон кількість опадів збільшилася лише в червні місяці. В осінній сезон (вересень, жовтень) кількість опадів помітно зросла, приблизно на 30-40%. Дослідження річної та сезонної кількості опадів дозволяє виявити основні особливості їх динаміки. Ідентифікувати засушливі періоди, для яких спостерігалися мінімальні кількості опадів, і встановити сильно зволожені

періоди (близько 1000мм) за рік, зокрема, підвищена кількість опадів спостерігалася у 2005-2008рр. Глобальне потепління стимулювало зменшення амплітуди коливань кількості опадів, що вказує на певну стабілізацію в окремі сезони року, особливо у літній та зимовий. Розрахунки зміни кількості опадів (за трендом) для різних періодів часу дають не однакові кількісні оцінки, це свідчить про відсутність стійкої тенденції зміни кількості опадів.

Для визначення тенденції змін кількості опадів за останні роки відносно середнього значення було використано референтний період 1981-2010рр. Порівняння даних відносно референтного періоду дозволило виявити певні особливості режиму зволоження на початку XXI ст. в літній сезон за сучасних змін клімату.

Вологість повітря є однією з важливих характеристик, яка відіграє значну роль у формуванні погоди та клімату. Режим вологості повітря характеризується парціальним тиском водяної пари (абсолютна вологість, пружність водяної пари), відносною вологістю і дефіцитом насичення.

Відносна вологість повітря визначається відношенням парціального тиску водяної пари, яка знаходиться у повітрі, до парціального тиску насиченої пари і характеризує ступінь насичення повітря водяною парою. З усіх показників вологості вона представляє найбільший практичний інтерес. Відносна вологість відображає мінливість вмісту вологи у повітрі в часі та просторі. Просторовий розподіл її визначається температурним режимом та надходженням вологи в атмосферу. З підвищенням температури повітря пружність насиченої водяної пари росте більш інтенсивніше, ніж фактичної, відносна вологість при цьому зменшується. Хід відносної вологості у приземному шарі завжди потилежний ходу температури.

Побудовані емпіричні розподіли для температури повітря (максимальної, мінімальної та середньодобової); відносної вологості повітря та швидкості вітру досить якісно апроксимуються нормальним законом розподілу (рис.3.1-3.2). Значення критерія Колмогорова-Смірнова, стосовно

перевірки гіпотези про відповідність емпіричних даних нормальному закону, вказують на цю відповідність.

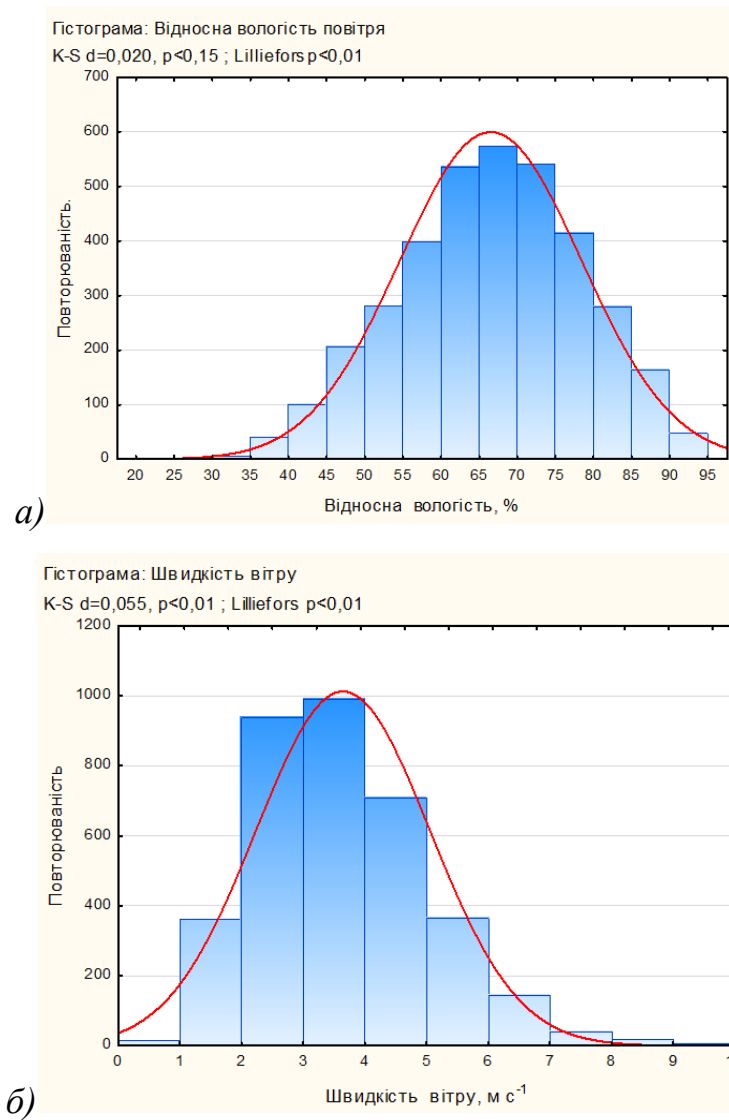


Рис.3.1 Емпіричний закон розподілу (відносна вологість(*a*); швидкість вітру(*б*))

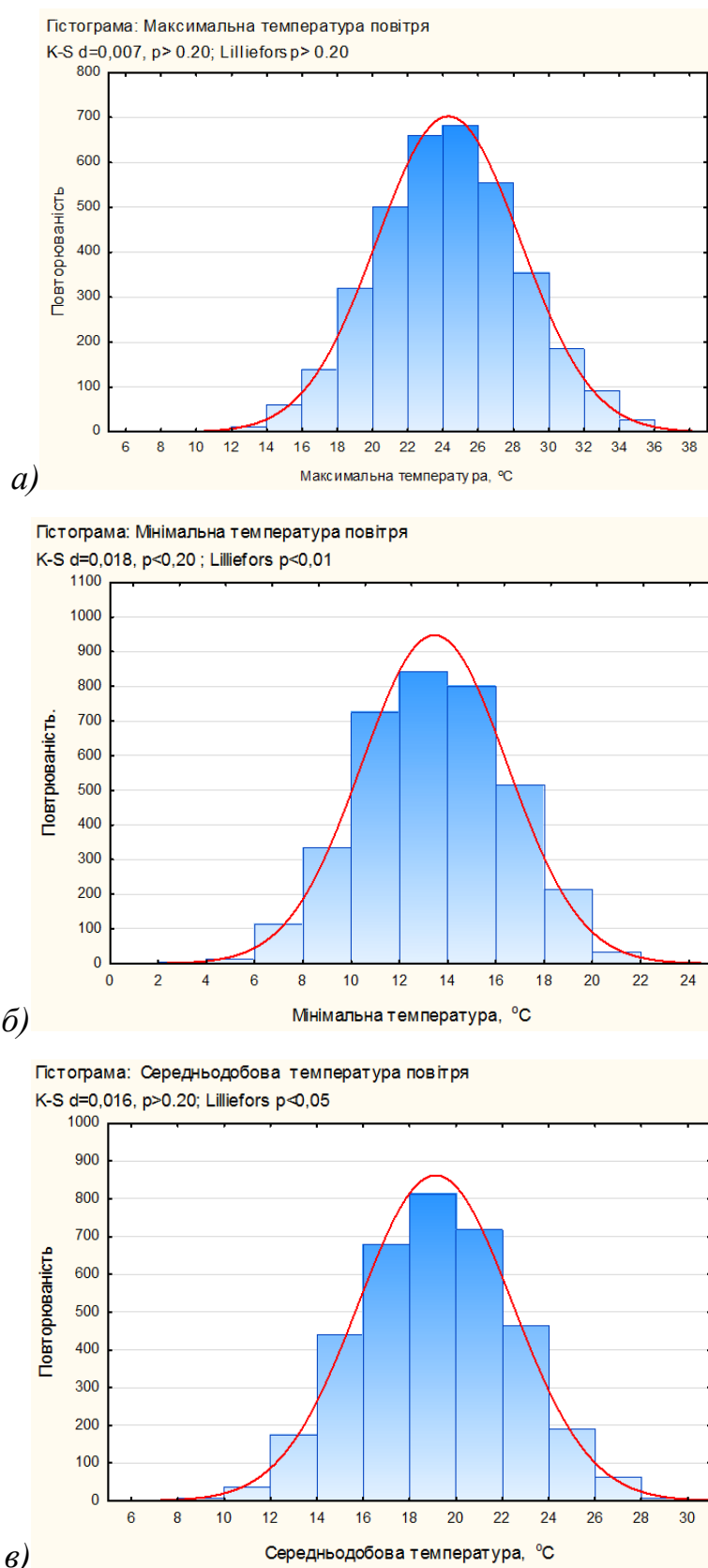


Рис.3.2 Емпіричний закон розподілу максимальної(а); мінімальної (б)та середньодобової(в) температури повітря

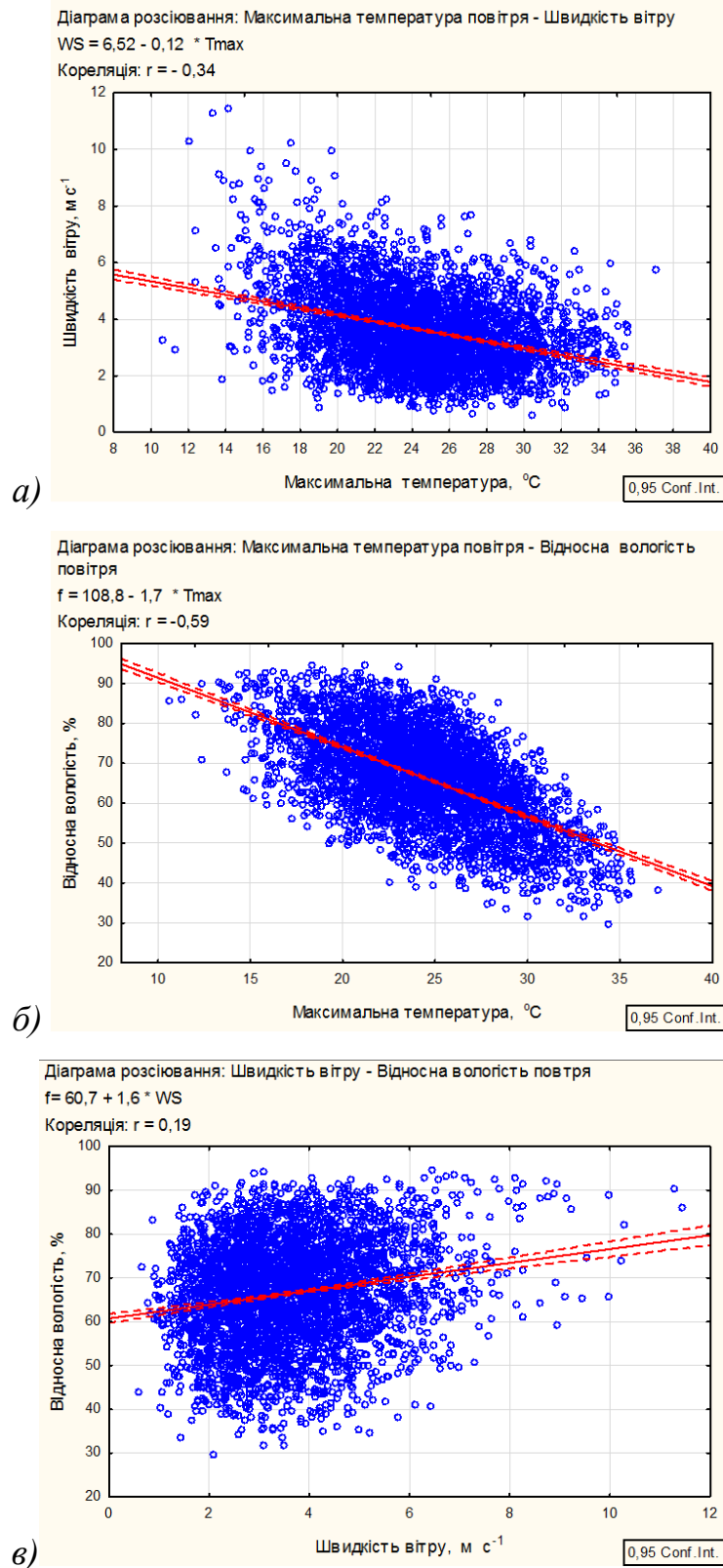


Рис. 3.3. Діаграми розсіювання (а - максимальна температура – швидкість вітру, б - максимальна температура – відносна вологість, в - швидкість вітру - відносна вологість)

Кореляційні поля (рис.3.3) вказують на присутність помірної кореляції між досліджуваними предикторами, окрім пари Відносна вологість-Швидкість вітру ($r=0.19$). Таким чином, є підстави побудувати регресійну залежність між залежною змінною Опаци (факторна ознака) та відповідними предикторами. Результати множинної лінійної регресії представлені в табл.3.5.

Таблиця 3.5.

Множинна лінійна регресія для залежної змінної Опаци

Результати множинної лінійної регресії для залежної змінної: ОПАДИ (ВІННИЦЯ.sta)						
R= 0.58;R ² = 0.34; F(4,3583)=457,85; p<0.0000						
N=3588	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(3583)	p-value
Intercept			-8,68016	1,098416	-7,90244	0,000000
f	0,380553	0,021458	0,15386	0,008676	17,73446	0,000000
WS	0,147975	0,014535	0,50528	0,049632	10,18040	0,000000
Tmin	0,329791	0,026244	0,52699	0,041937	12,56618	0,000000
Tmax	-0,277382	0,033172	-0,32867	0,039305	-8,36196	0,000000

Нормалізовані значення коефіцієнтів регресії (b^*) вказують, що найвпливовішими предикторами є відносна вологість та мінімальна температура. Проте модель виявилася не якісною, оскільки коефіцієнт детермінації - статистичний показник, що використовується в статистичних моделях як міра залежності варіації залежної змінної від варіації незалежних змінних, який вказує наскільки отримані спостереження підтверджують модель, виявився недостатнім ($R^2= 0.34$).

У зв'язку з цим, було проведено нелінійне регресійне дослідження для вказаних змінних. Побудована поліноміальна регресійна модель (табл.3.6), яка виявилася значно ефективнішою, про що свідчать статистичні показники (R; R²; F). Нелінійна модель має наступний вигляд:

$$\text{ОПАДИ} = - 42.1 + 2.1 f - (27.6 \cdot f^2 - 0.001 \cdot f^4 + 17 \cdot \text{WS}^2 - 1.2 \cdot \text{WS}^4) \cdot 10^{-3}$$

Значення нормалізованих коефіцієнтів регресії вказують на домінуючий вплив предикторів, що представляють вологість повітря, на результативну ознаку.

Таблиця 3.6

Множинна нелінійна регресія для залежної змінної Опаци

Результати нелінійної регресії для залежної змінної: ОПАДИ (ВІННИЦЯ.sta) R= 0.71; R ² = 0.50; F(5,3582)=727,97; p<0.0000 ; Std.Error of estimate: 3.40						
N=3588	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(3582)	p-value
Intercept			-42,1018	4,270242	-9,8593	0,000000
f**4	4,58507	0,258989	1 10 ⁻⁶	0,000000	17,7037	0,000000
f**2	-9,00021	0,697622	-0,0276	0,002141	-12,9013	0,000000
WS**4	0,20547	0,024873	0,0012	0,000144	8,2609	0,000000
f	5,08069	0,451023	2,1	0,182351	11,2648	0,000000
WS**2	-0,04343	0,024930	-0,0170	0,009749	-1,7420	0,041593

З метою отримання більш простої, але ефективної моделі, було проведено дослідження однофакторної нелінійної моделі, зокрема, поліноміальної (Табл.3.7):

**Множинна однофакторна нелінійна регресія для залежної змінної
Опади**

N=3588	Результати нелінійної регресії для залежної змінної: ОПАДИ ВІННИЦЯ.sta) R= 0.69; R ² = 0.48 F(3,3584)=1088,5 p<0.0000; Std.Error of estimate: 3.49					
	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(3584)	p-value
Intercept			-46,5706	4,371901	-10,6523	0,000000
f**4	4,94763	0,264611	0,000001	0,000000	18,6977	0,000000
f**2	-9,83466	0,713731	-0,0302	0,002191	-13,7792	0,000000
f	5,58952	0,461625	2,2599	0,186638	12,1084	0,000000

Модель виявилася значно простішою, при цьому вплив всіх доданків рівносильний, про що свідчать нормалізовані коефіцієнти регресії; несуттєво зменшився коефіцієнт множинної регресії при цьому, критерій Фішера, що відображає адекватність моделі помітно зріс ($F=1088,5$). Нелінійна однофакторна модель Опади-Вологість, має наступний вигляд:

$$\text{ОПАДИ} = -46.6 + 2.3 f - 0.030 \cdot f^2 - 0.000001 \cdot f^4$$

Отримати статистично вагому регресійну однофакторну залежності Опади – Температура не вдалося. Як видно з **табл. 3.8**, регресійна поліноміальна модель Опади-Температура, виявилася не ефективною, виходячи з статистичних критеріїв.

Регресійна поліноміальна модель Опади-Температура

Результати нелінійної регресії для залежної змінної: ОПАДИ (ВІННИЦЯ-.sta)						
R= 0.35; R ² =0.12; F(2,3585)=244.35; p<0.0000; Std.Error of estimate: 4.53						
N=3588	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(3585)	p-value
Intercept			31,59858	2,007436	15,7408	0,000000
Tmax	-1,75171	0,140150	-2,07560	0,166064	-12,4988	0,000000
Tmax **2	1,45504	0,140150	0,03515	0,003386	10,3820	0,000000

3. 3. Імовірнісний прогноз зволоженого режиму

Якщо зосередитися лише не крайнощах зволоженого режиму, то при дефіциті вологи, виникають кліматичні катаклізми – посуха, суховії. У зв'язку з глобальним потеплінням клімату Землі, як відзначалося на конференціях Сторін Конвенції ООН з питань боротьби з опустелюванням (грудень 2000 р. та вересень 2001 р.), в теперішній час у глобальному масштабі домінують дві проблеми. Перша – глобальне потепління, з яким пов'язані значні кліматичні аномалії, які викликали зміну частоти таких небезпечних та стихійних явищ погоди, як зливи, паводки, шквали. Друга – розповсюдження засух, особливо у країнах, розміщених південніше 40°пн.ш., де експерти Всесвітньої метеорологічної Організації (ВМО) передбачають у найближчому майбутньому зменшення кількості опадів [Татарчук, Барабаш (2007)]. На клімат України впливають особливості фізико-географічного положення та циркуляційні процеси, які сприяють формуванню різноманітності кліматичних умов, що призводить до різних гідрометеорологічних ускладнень та екстремальних метеорологічних явищ погоди, зокрема, можуть зумовлювати несприятливі явища, значна частка з яких – посушливі. Під суховієм розуміють сухий і пекучий вітер, який

викликає порушення водного балансу рослин, їх пригніченість і загибель. Суховії належать до посушливих небезпечних метеорологічних явищ погоди, які завдають значних збитків сільському господарству та іншим галузям економіки. Згідно з [Інструкція гідрометеорологічним станціям... (1998)] та [Татарчук, Барабаш (2007)], були використані наступні критерії суховію: поєднання хоча б в один із строків спостережень таких метеорологічних елементів, як температура повітря 25°C і вище, відносна вологість повітря 30% і менше і швидкість вітру на висоті флюгера – $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ і більше. Таким чином, суховій може бути представлений, як випадковий вектор, проекціями якого є максимальна температура, відносна вологість та швидкість вітру. Як видно з рис.4.3, проекції випадкового вектору суховій – не ортогональні, оскільки між ними існує помірний кореляційний зв'язок. Крім того, емпіричний розподіл метеорологічних величин, що являються проекціями даного випадкового вектору, добре апроксимується нормальним законом розподілу. Все це дозволяє застосувати імовірнісний калькулятор, побудований на основі 3-Д нормального розподілу. Імовірність виникнення «температурно-вологісно-вітрових» умов, що притаманні суховію розраховувалася згідно алгоритму, представленому в розділі 2.

Кліматичні критерії, що висуваються до явища «суховій» мають імовірність менше 1%, для метеостанції Вінниця (рис.3.4).

Аналогічні 3-D поверхні побудовані і для решти станцій (рис.3.5 – 3.12). Більш детально імовірність виникнення суховіїв описана у табл.3.9.

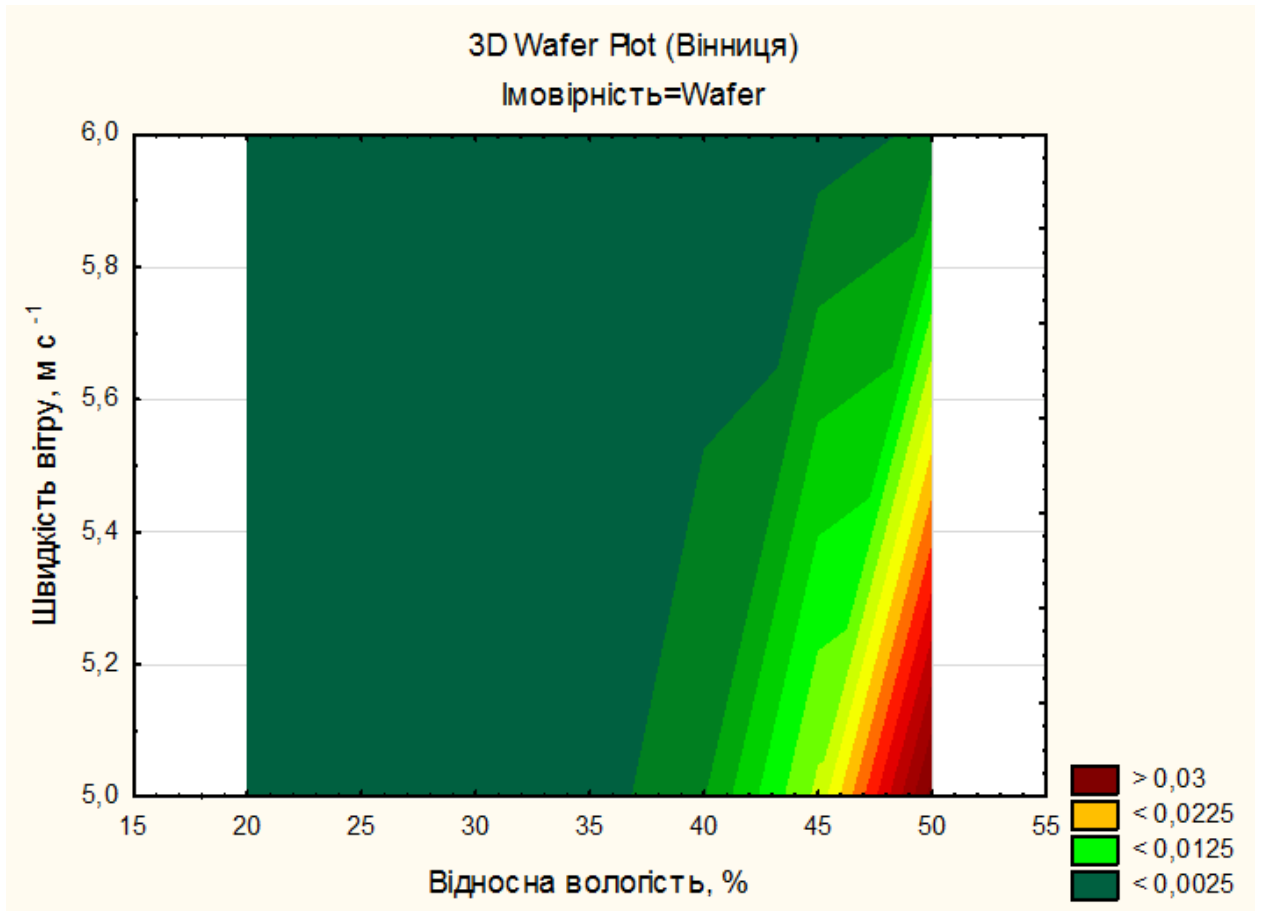


Рис.3.4. 3-Дповерхня випадкового вектору-суховій(Вінниця).

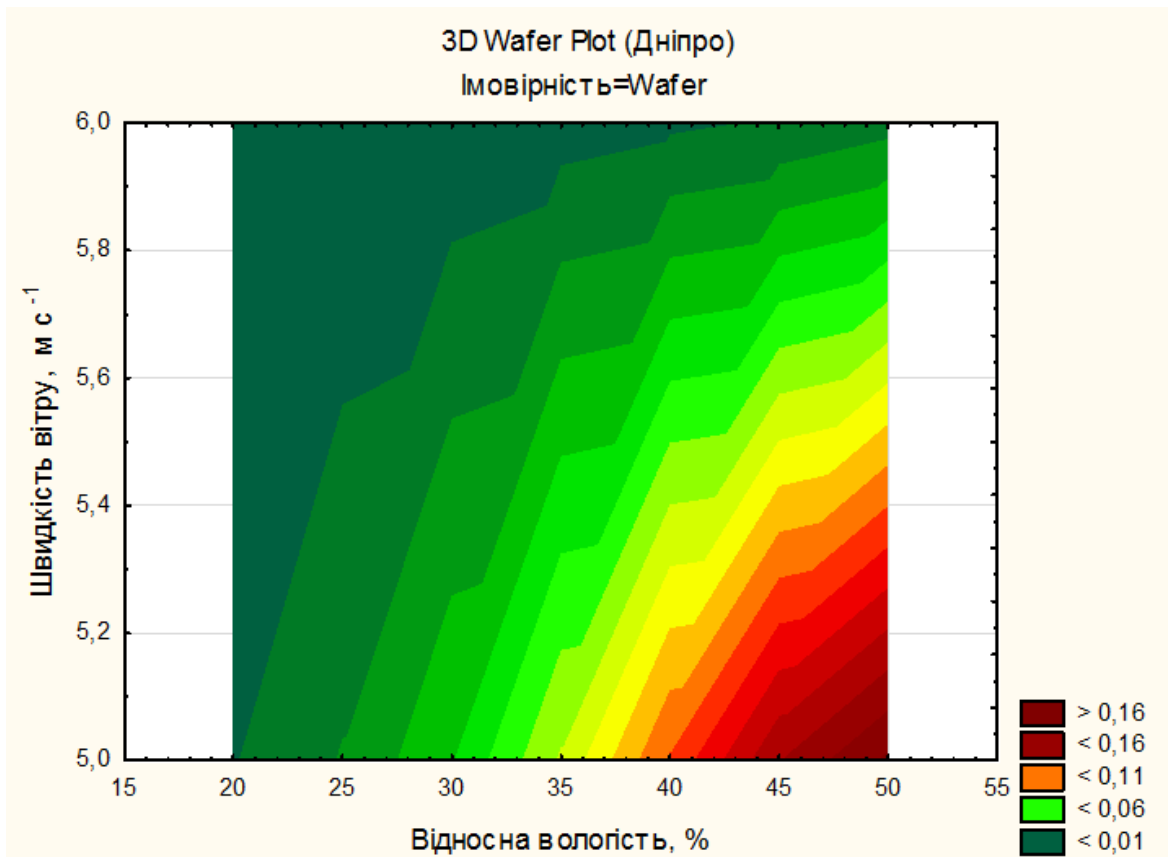


Рис.3.5. 3-Дповерхня випадкового вектору-суховій (Дніпро).

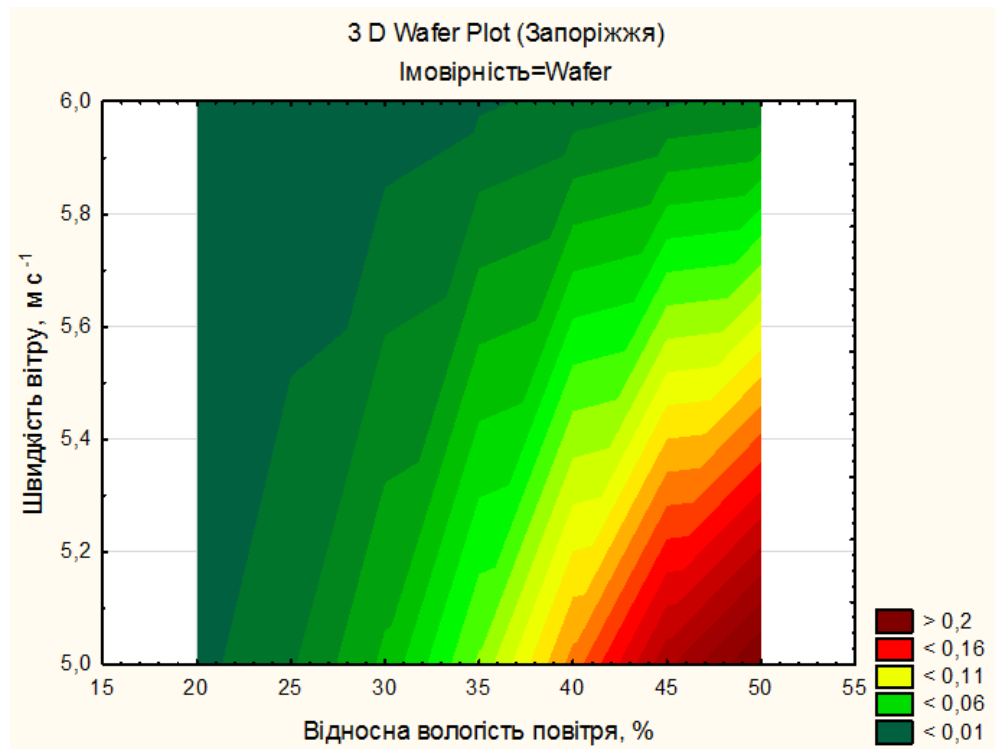


Рис.3.6. 3-Dповерхня випадкового вектору-суховій (Запоріжжя).

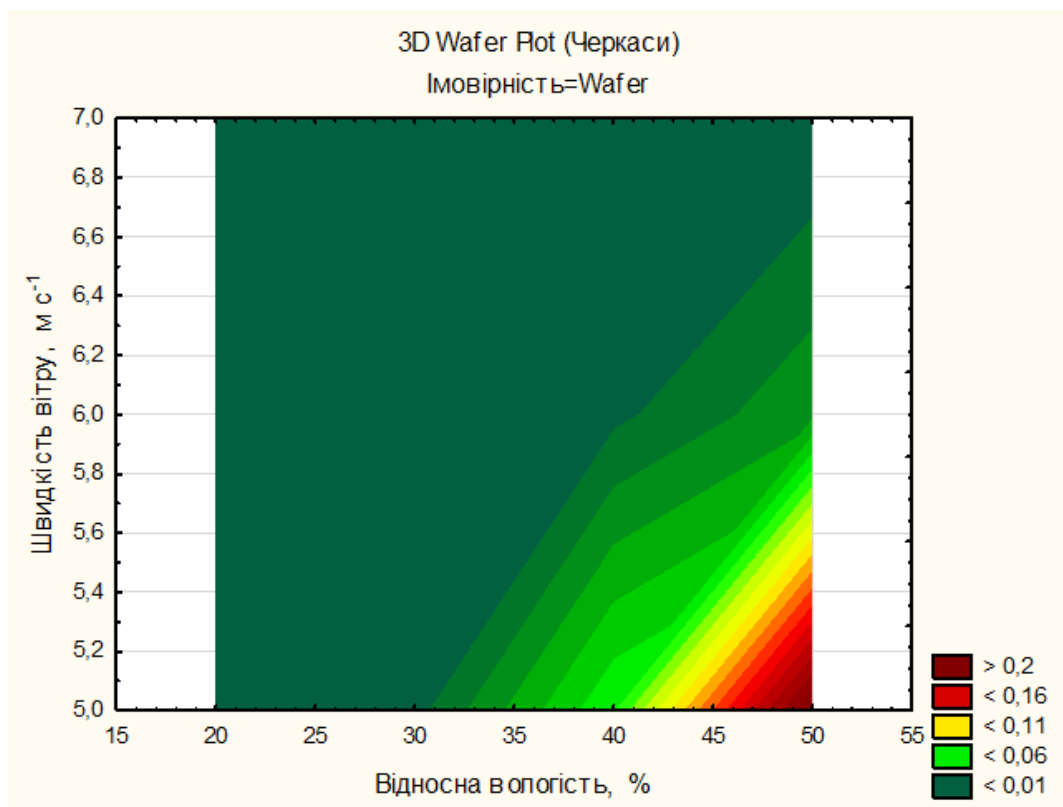


Рис.3.7. 3-Dповерхня випадкового вектору-суховій (Черкаси).

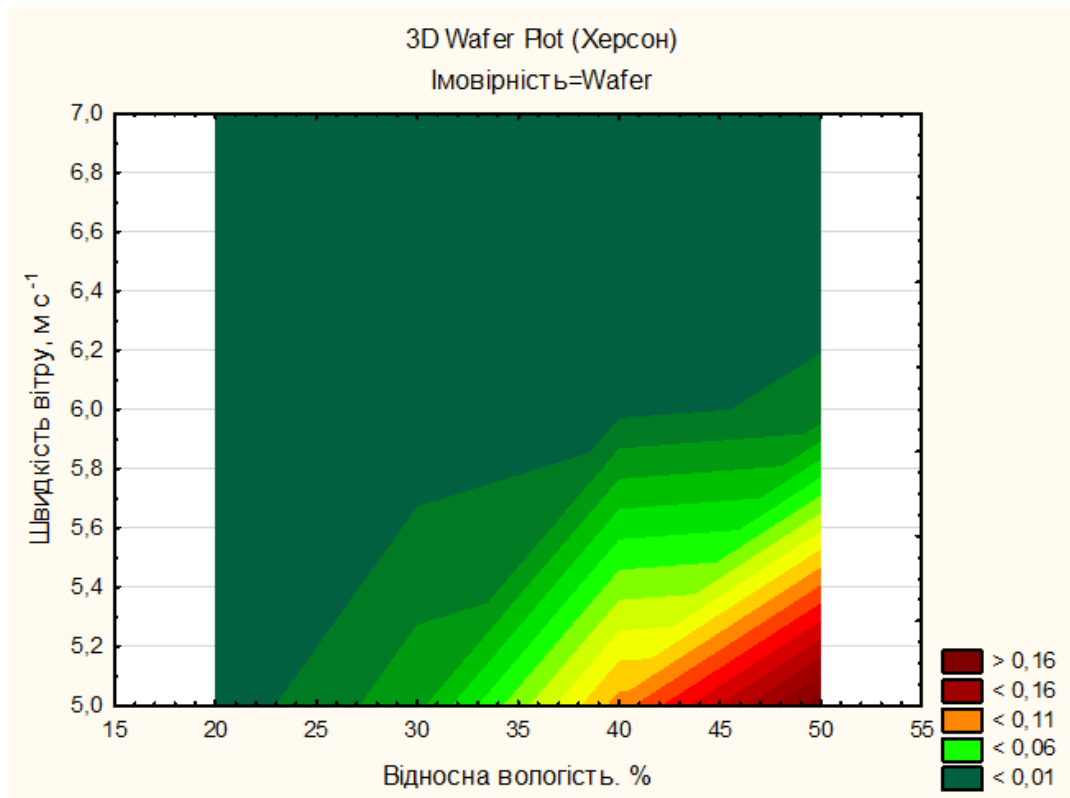


Рис.3.8. 3-Дповерхня випадкового вектору-суховій (Херсон).

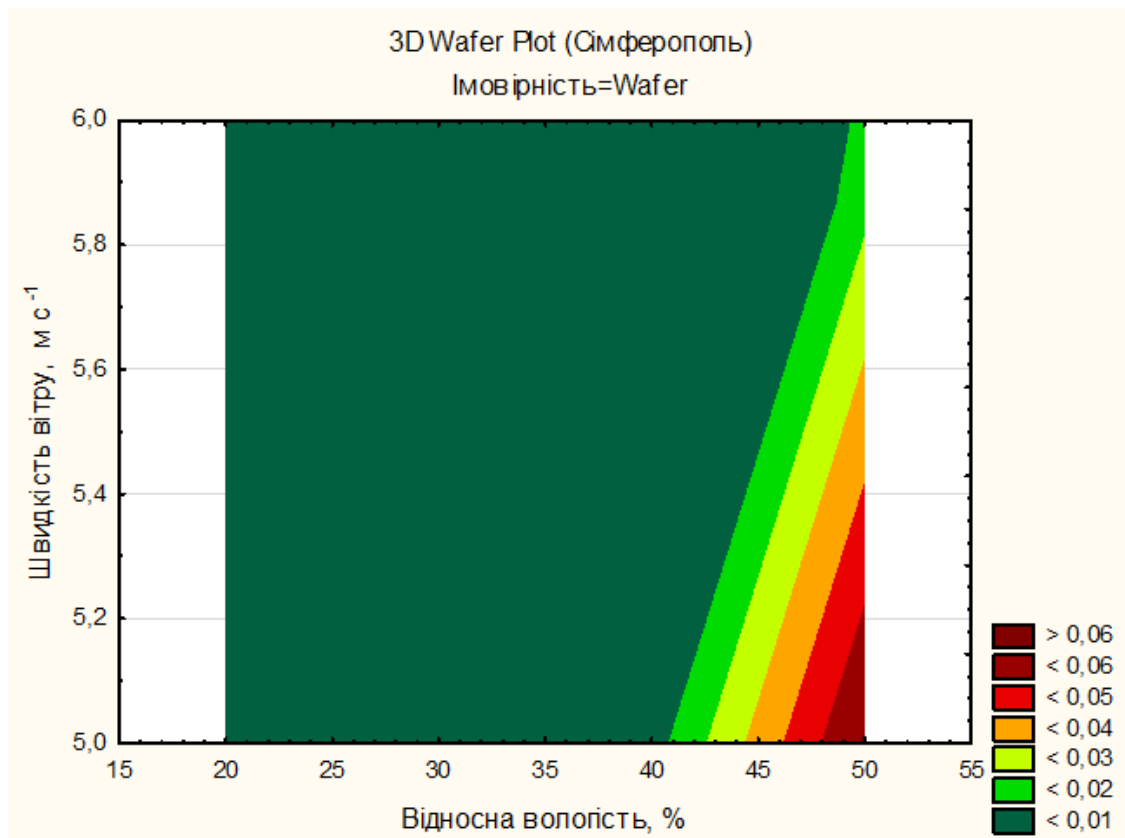


Рис.3.9. 3-Дповерхня випадкового вектору-суховій (Сімферополь).

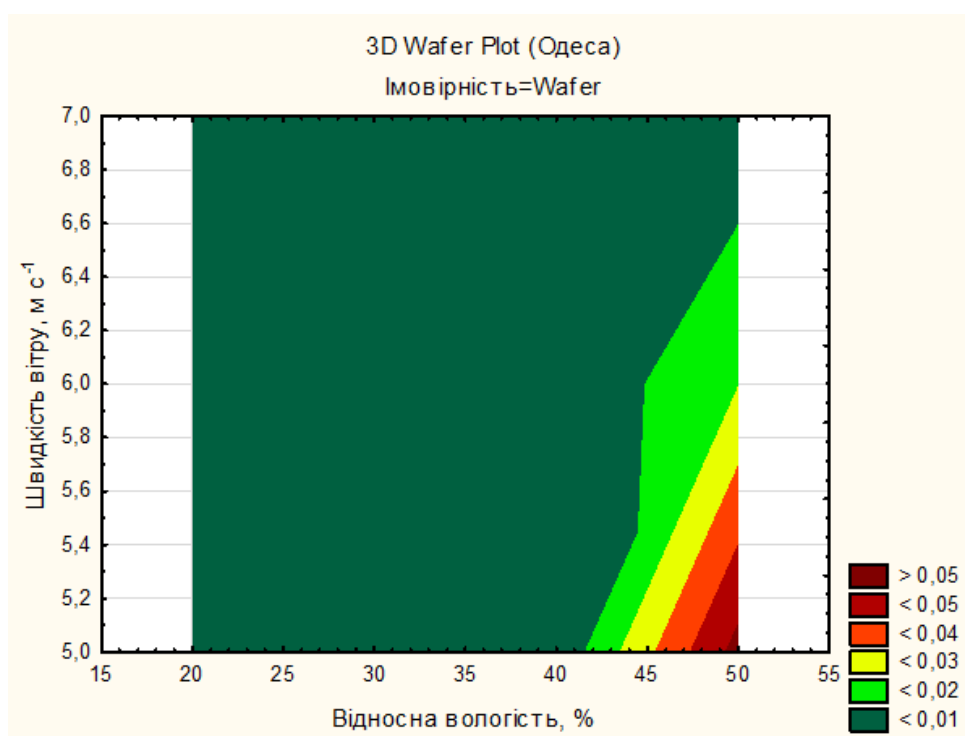


Рис.3.10. 3-Дповерхня випадкового вектору-суховій (Одеса).

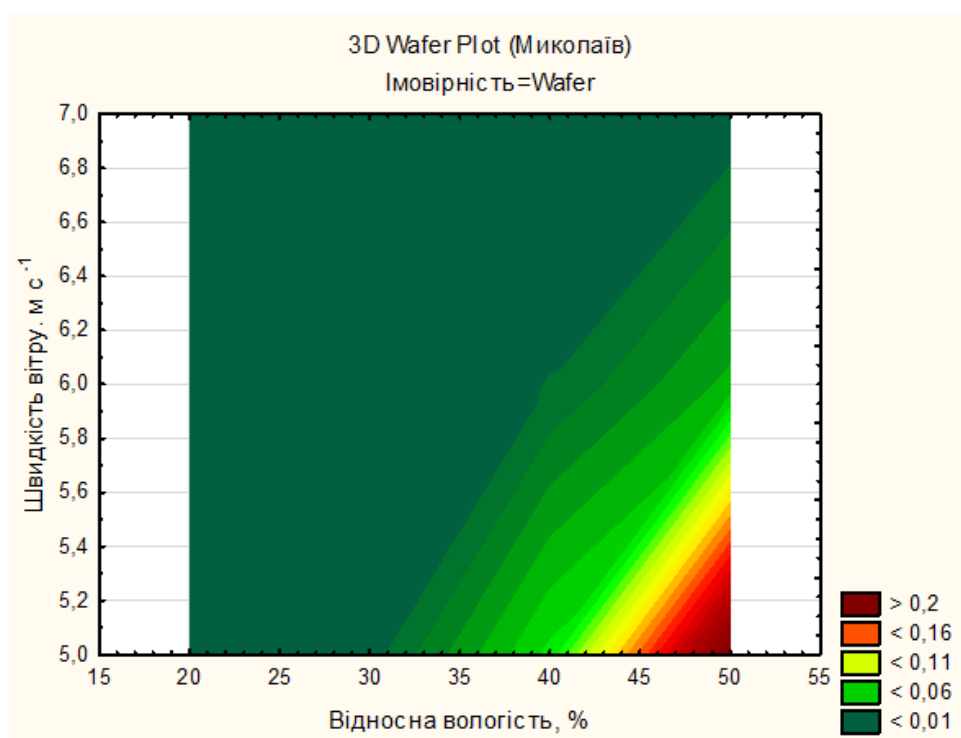


Рис.3.11. 3-Дповерхня випадкового вектору-суховій (Миколаїв).

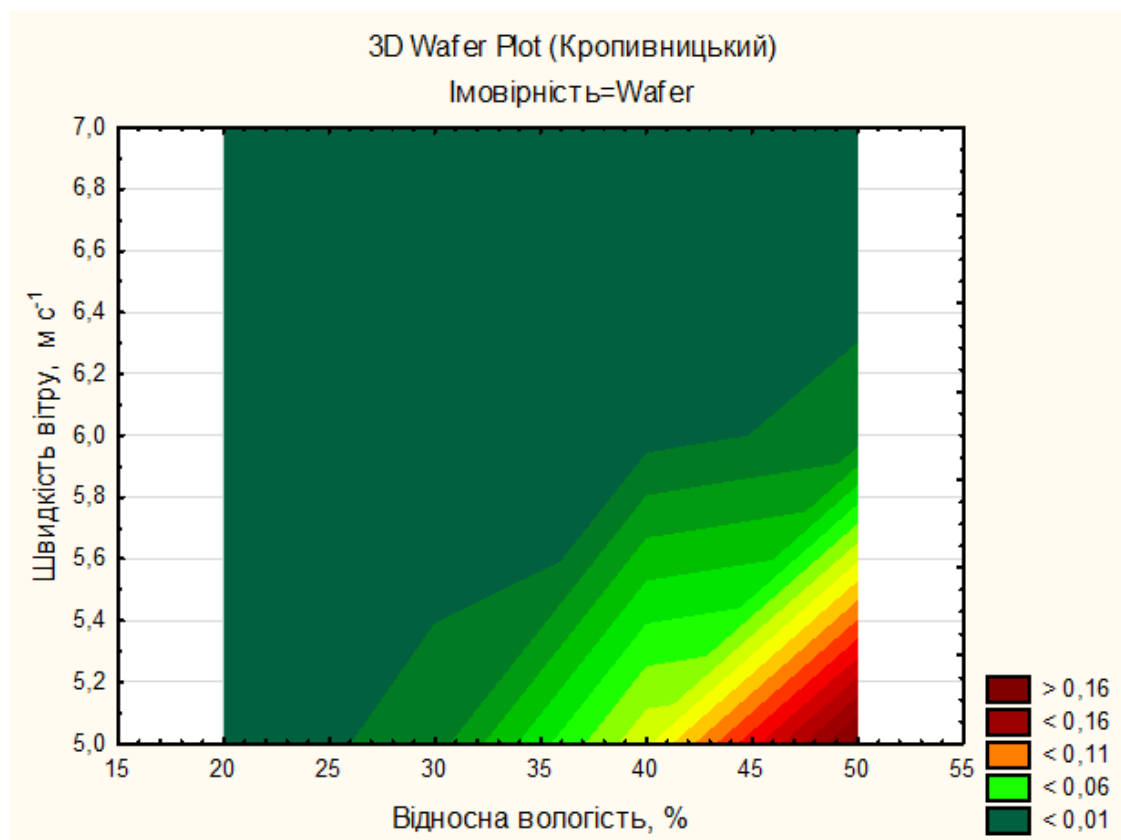


Рис.3.12. 3-Дповерхня випадкового вектору-суховій (Кропивницький).

Таблиця 3.9.

Імовірність виникнення суховію в літній сезон

$$(T \geq 25^{\circ}\text{C}; WS \geq 5\text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; f < 30\%)$$

МС	P_T	P_{WS}	P_f	P_{3G}
Вінниця	0.43	0.17	0.01	<0.0025
Дніпро	0.75	0.19	0.02	0.04
Запоріжжя	0.78	0.21	0.02	0.04
Кропивницький	0.67	0.19	0.01	0.02
Миколаїв	0.76	0.27	0.005	0.01
Одеса	0,59	0.33	0	<0.01
Сімферополь	0.60	0.22	0	<0.01
Херсон	0.85	0.18	0.02	0.03
Черкаси	0.62	0.14	0.005	<0.01

Оскільки, як вже відмічалось вище, температура повітря, швидкість вітру та відносна вологість повітря досить якісно апроксимуються

нормальним законом розподілу, то це дозволило застосувати імовірнісний калькулятор 1-G та визначити імовірності критичних значень метеовеличин, що відповідають явищу суховій (табл. 3.9). Як видно з таблиці, імовірність виникнення погодних умов, за яких відносна вологість повітря $\leq 30\%$ не перевищила 2%. При цьому слід зазначити, що для температури та швидкості вітру імовірність задовольнити критичні значення (суховію) достатньо висока, особливо для температури. Розрахунок імовірності 3-Sпоказав дещо вищі імовірності ніж для відносної вологості. Так для МС (Дніпро та Запоріжжя) імовірність виникнення суховію в літній сезон складає 4%, тобто приблизно 3-4 випадки за сезон. Водночас для МС (Вінниця; Одеса; Сімферополь та Черкаси) виникнення суховію протягом літнього сезону не перевищує одного випадку.

Оскільки, як вже зазначалось, для Дніпра та Запоріжжя імовірність виникнення посухи за літній сезон є найвищою, розглянемо більш детально метеорологічні показники цих станцій.

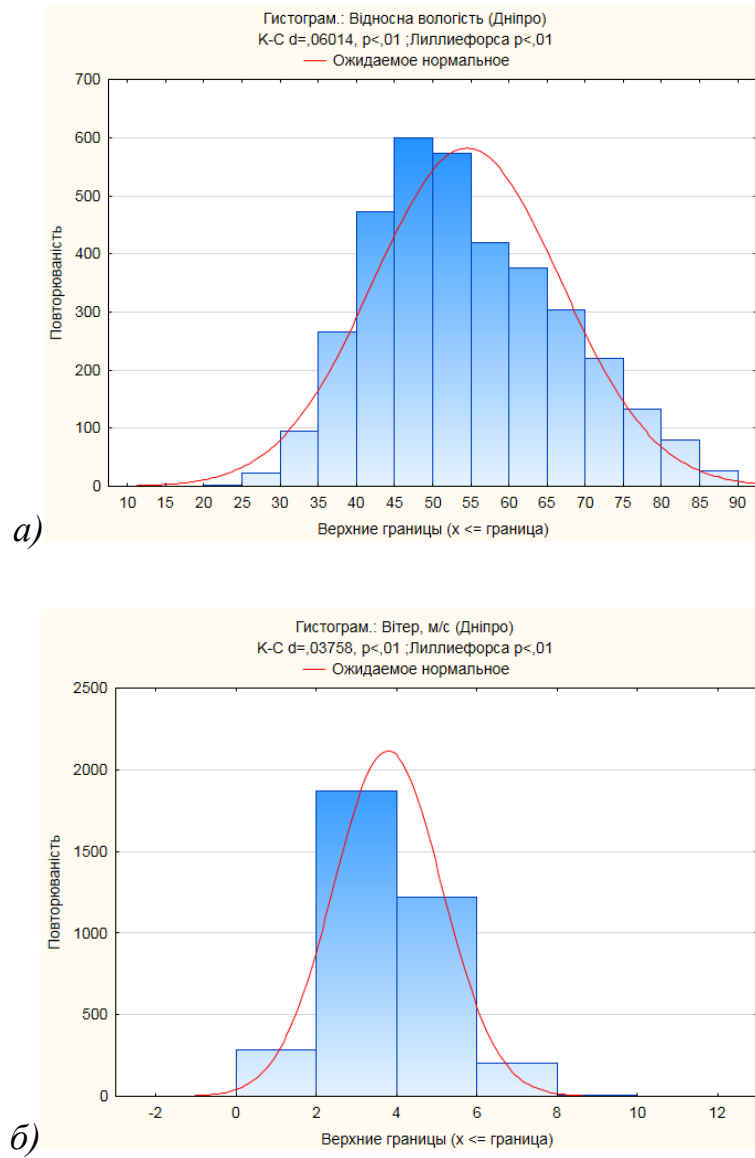


Рис.3.13. Емпіричний закон розподілу (відносна вологість(*a*); швидкість вітру(*b*)) для метеорологічної станції Дніпро

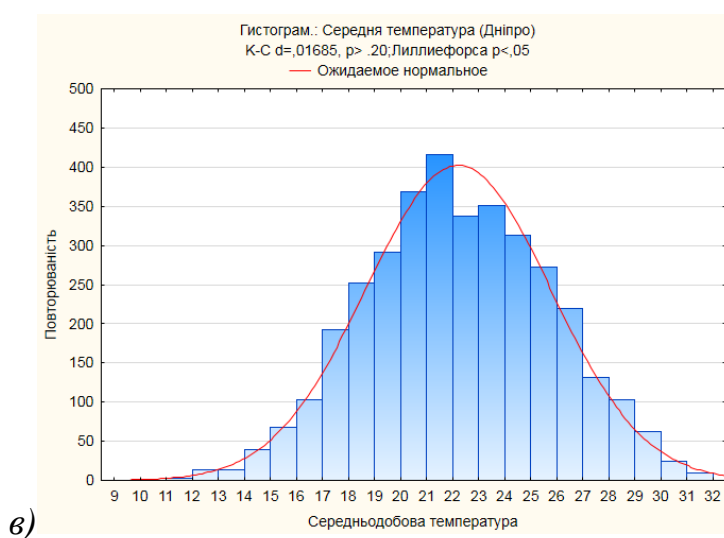
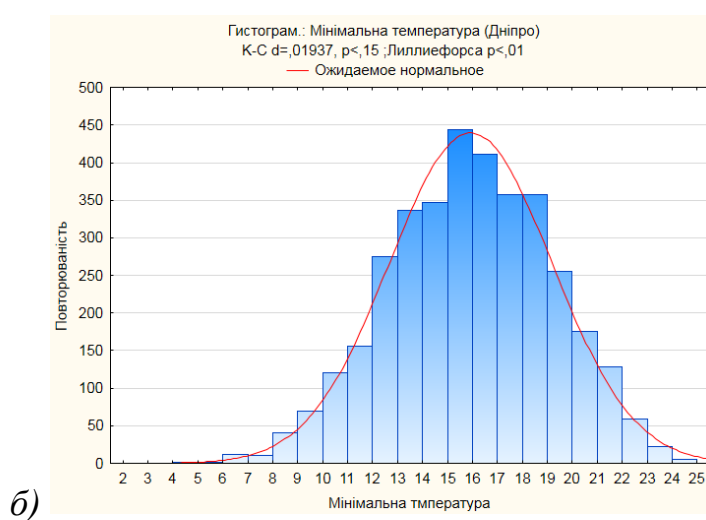
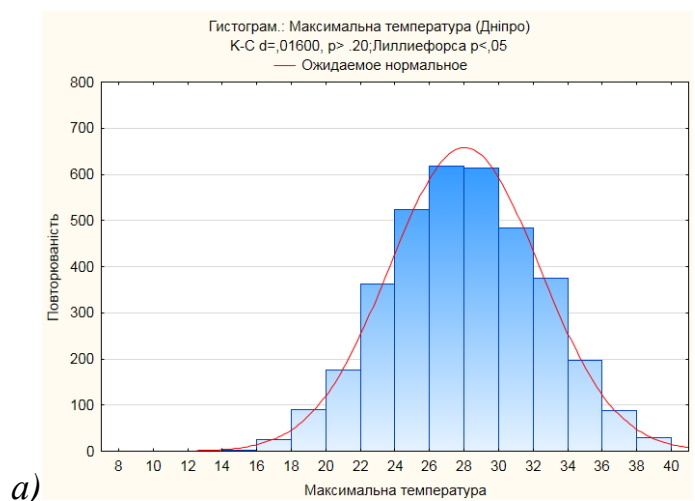


Рис.3.14. Емпіричний закон розподілу максимальної(а); мінімальної (б)та середньодобової(в) температури повітря для метеорологічної станції Дніпро

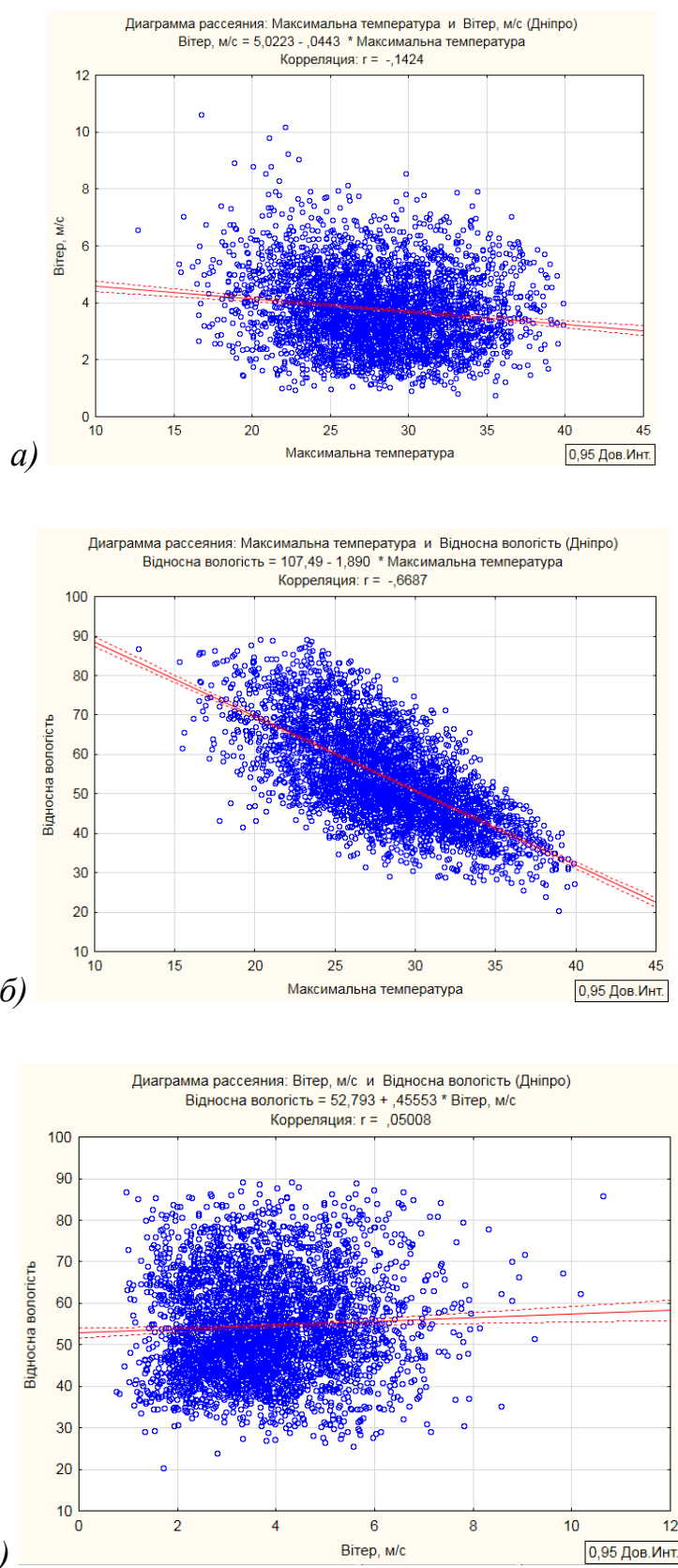


Рис. 3.15. Діаграми розсіювання (а - максимальна температура – швидкість вітру, б - максимальна температура – відносна вологість, в - швидкість вітру - відносна вологість) для метеорологічної станції Дніпро

Побудовані емпіричні розподіли для температури повітря (максимальної, мінімальної та середньодобової); відносної вологості повітря та швидкості вітру для станції Дніпро вказують на можливість спостереження посушливих явищ(рис.3.13-3.14). Особливо чітко це простежується у досить низьких вологостях повітря та високій повторюваності бездощових днів.Кореляційні поля (рис.3.15) вказують на майже відсутність кореляції у парі Максимальна температура – Відносна вологість, у той час як у інших пар кореляція присутня. Це вказує на якісну апроксимацію метеорологічних величин нормальним розподілом випадкових величин. А отже суховій теж підкоряється нормальному розподілу, що дає змогу розуміти передбачуваність виникнення даного явища.

Для станції Запоріжжя емпіричні розподіли для температури повітря (максимальної, мінімальної та середньодобової); відносної вологості повітря та швидкості вітру, як і для минулої станції,вказують на можливість спостереження посушливих явищ та мають умови для виникнення суховіїв.(рис.3.16-3.17). Особливо чітко це простежується у досить низьких вологостях повітря та високій повторюваності бездощових днів, як і для минулої станції.Кореляційні поля (рис.3.18) вказують на присутність помірної кореляції у парі Максимальна температура – Відносна вологість, що лише підтверджує минулі графіки, а от кореляція для пари Відносна вологість – Вітер є досить низькою.

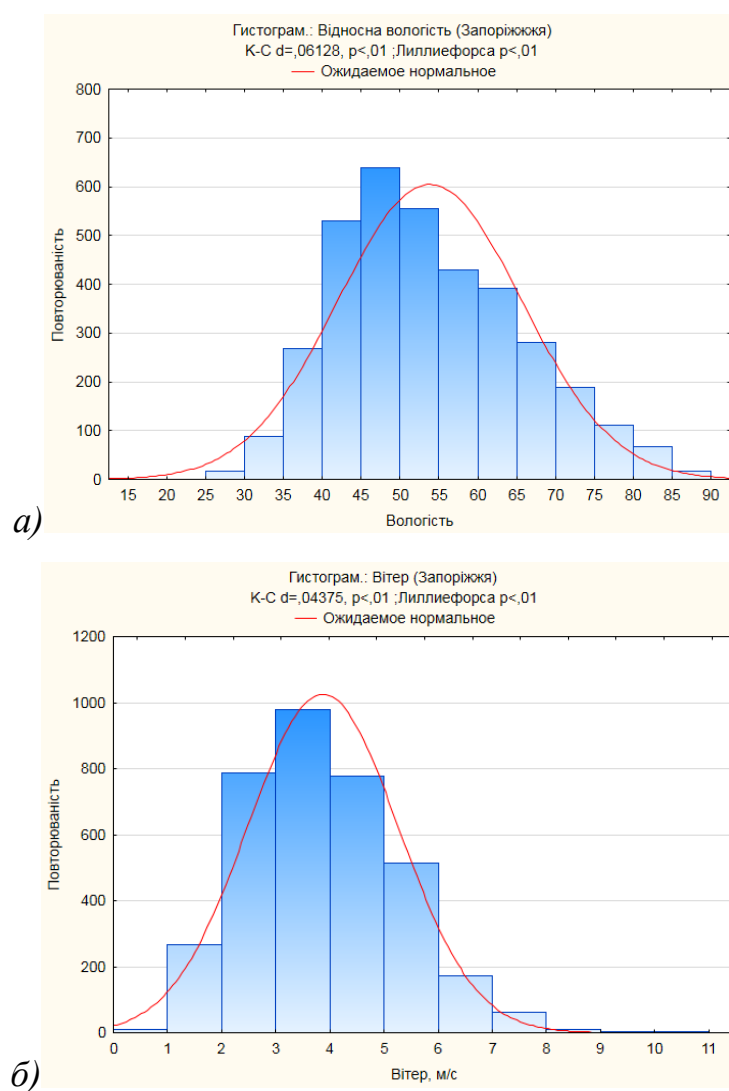


Рис.3.16. Емпіричний закон розподілу (відносна вологість(*a*); швидкість вітру(*б*); опади(*в*)) для метеорологічної станції Запоріжжя

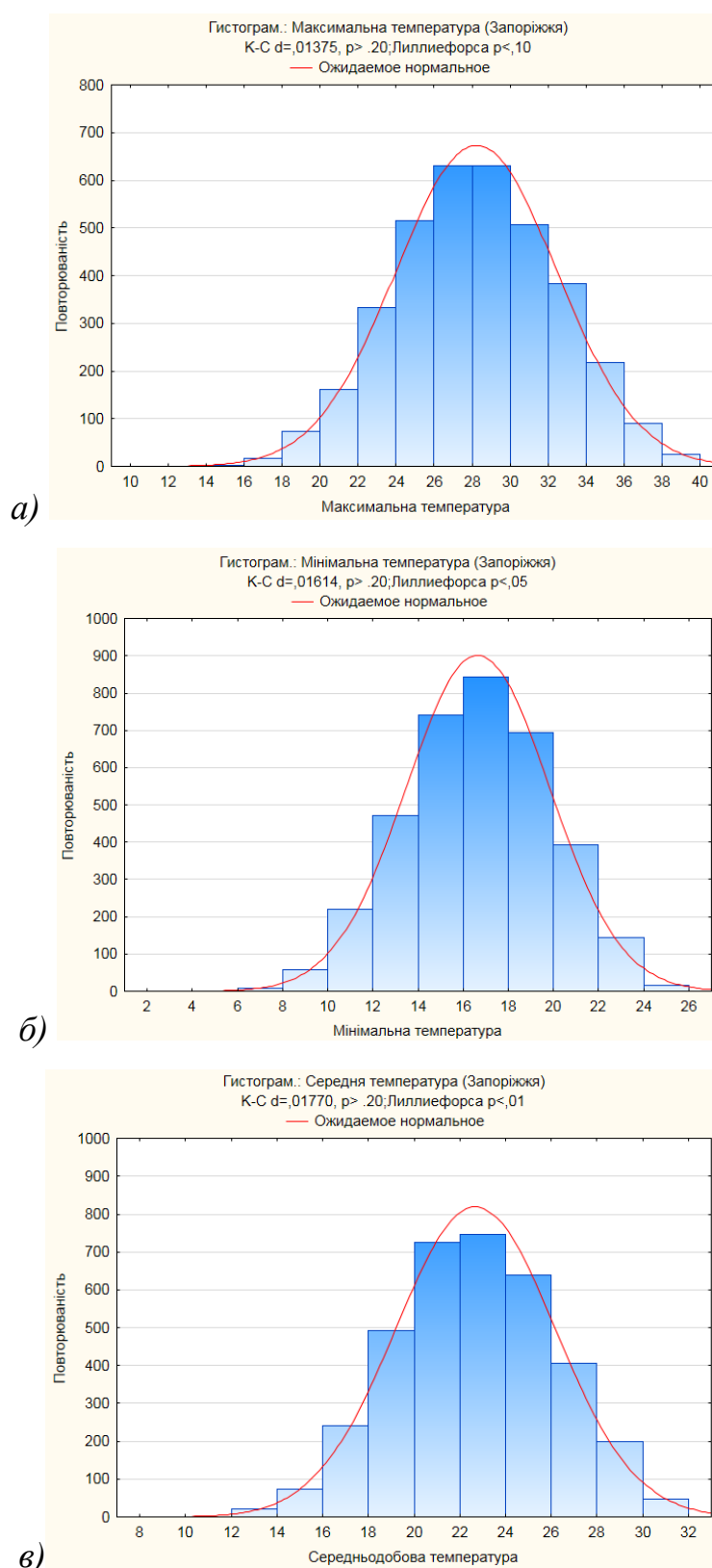


Рис.3.17. Емпіричний закон розподілу максимальної(а); мінімальної (б)та середньодобової(в) температури повітря для метеорологічної станції Запоріжжя

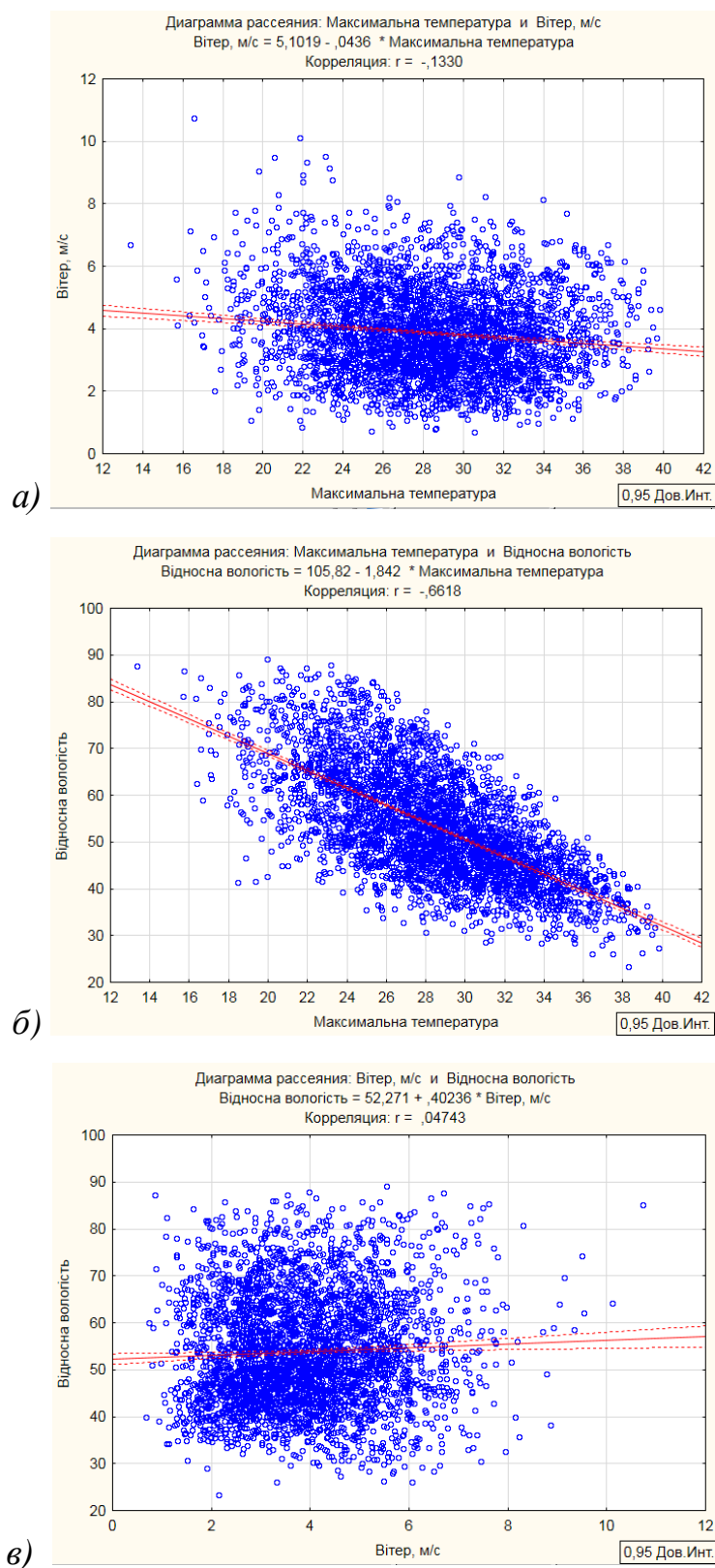


Рис. 3.18. Діаграми розсіювання (а - максимальна температура – швидкість вітру, б - максимальна температура – відносна вологість, в - швидкість вітру - відносна вологість) для метеорологічної станції Запоріжжя

Як уже згадувалось в розділі 1, пре дикторами суховіїв є швидкість вітру, температура повітря та відносна вологість повітря. При чому відносна вологість має бути 30% і нижче, температура повітря має бути підвищена (21-25°C), а швидкість вітру досить помірнa – до 5м/с, хоча можуть спостерігатися і значні пориви.

Якщо порівняти діаграми МС Вінниця (**рис.3.1**), де за обрахунками суховії – досить рідке явище, а також МС Дніпро та Запоріжжя (для МС Дніпро – **рис. 3.13**, для МС Запоріжжя – **рис.3.16**), де суховії зустрічаються найчастіше, стане цілком зрозумілою частота виникнення суховіїв.

Для початку варто звернути увагу на відносну вологість. Тут помітно, що для нехарактерної для суховіїв території (МС Вінниця) вологість повітря є досить високою, найбільша повторюваність – близько 60%, у той час як для МС Дніпро та Запоріжжя найчастіша повторюваність відносної вологості повітря лишається в межах 35-45%, що є досить типовим для виникнення суховіїв.

Швидкість вітру є досить помірною для всіх трьох станцій, 2-4 м/с, що є досить сприятливим для виникнення суховіїв.

Середньодобова температура повітря на МС Вінниця (**рис.3.2**) у більшості випадків є нижчою за 20°C, що є нехарактерним для виникнення суховіїв. Зовсім інша картина у МС Дніпро (**рис.3.14**) та Запоріжжя (**рис.3.17**), де середньодобова температура у більшості випадків сягає 20-24°C. Це означає, що тут є сприятливіші умови для виникнення суховіїв.

Після розгляду метеорологічних показників стає зрозуміло, що МС Вінниця є несприятливою територією для виникнення суховіїв, тому розрахунки, які вказують на їх малу частоту виникнення, є виправданими.

З розгляду метеорологічних показників видно, що на МС Дніпро та МС Запоріжжя є всі умови для виникнення суховіїв, і це також підкреслює вищевказані розрахунки. А також це лише підтверджує той факт, що найвищою є імовірність виникнення суховіїв на південному сході України, де і розташовані Дніпро та Запоріжжя.

ВИСНОВКИ

1. Кліматичні умови України сприяють утворенню різних типів посушливих явищ, які впливають, головним чином, на сільськогосподарську діяльність.
2. До небезпечних метеорологічних явищвідносятьсятакож посухи та суховії, які можуть пошкоджувати сільськогосподарські культури, особливо у період вегетації. Проте не кожне несприятливе метеорологічне явище є небезпечним для сільського господарства. Небезпечні явища відрізняються інтенсивністю, площею поширення тощо. Посуха та суховії належать до особливо небезпечних у тому разі, коли вони охоплюють понад 10% посівної площі відповідного регіону при тривалості більше 10 днів жаркої, сухої погоди та незначних (менше 10 мм) запасах ефективної вологи в орному шарі ґрунту.
3. Для оцінки інтенсивності посухи застосовувалися індекси, рекомендовані ВМО, що характеризують різні типи посухи за різними температурно-вологісними показниками. Проведений порівняльний аналіз індексів посухи показав, що жоден індекс, не перевершив решту, проте деякі з них виявилися більш чутливими до кліматичних змін. Так, індекси SPI та SPEI в досліджуваних посушливих періодах ідентифікували посухи різних рівнів прояву.
4. Встановлена повторюваність посухи за референтний період 1981-2010рр. В сучасному періоді спостерігається тенденція до зростання метеорологічної посухи.
5. На території України виділяють два кластери, де найчастіше виникають суховії. Перший включає Миколаївську, Дніпропетровську, Запорізьку, Херсонську і степові райони Криму; другий — східні райони Луганської та південно-східні райони Донецької областей. За період 1981-2019 рр. в літній період були проведені імовірнісні оцінки виникнення суховію на території України. Встановлено, що в м.Дніпро та м.Запоріжжя

імовірність виникнення посушливих явищ та суховіїв є найвищою (до 4 випадків за літо).

6. Дослідження показали, що несприятливий вплив сухості повітря і ґрунту на живі організми фіксується через 10 днів після початку спостережень посушливих явищ, і саме тому їх оцінка та прогнозування можуть допомогти уникнути більшості негативних наслідків особливо для сільського господарства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алпатьев А.М. О показателе засухи / А.М. Алпатьев // Метеорология и гидрология. – 1955. – № 4. – С. 40-49.
2. Алпатьев А.М. Характеристика и географическое распространение засухи / А.М. Алпатьев, В.Н. Иванова // Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай / Под ред. А.И. Руденко. – Л.: Гидрометеиздат, 1958. – С.31-46.
3. Барабаш М.Б. К уточнению критерия засушливости для Украины / М.Б. Барабаш, З.Л. Десяткова// Труды УкрНИГМИ. – 1979. – Вып. 174. – С.18-21.
4. Барабаш М.Б. Дослідження змін та коливань опадів на рубежі ХХ і ХХІ ст. в умовах потепління глобального клімату/ Барабаш М.Б., Корж Т.В., Татарчук О.Г. - Наук. праці УкрНДГМІ, 2004, Вип. 253
5. Барабаш М.Б., Емельянова Ж.Л. Закономерности пространственно-временного распределения засушливых условий на Украине / М.Б. Барабаш, Ж.Л. Емельянова // Труды УкрНИГМИ. – 1990. – Вып. 238. – С. 94-101.
6. Бучинский И.Е. Засухи и суховеи / И.Е. Бучинский. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 214с.
7. Бучинский И.Е. Засухи, суховеи и пыльные бури на Украине и борьба с ними / И.Е. Бучинский. – К.: Урожай, 1970. – 236с.
8. Волеваха В.О. Суховії на Україні / В.О. Волеваха, В.І. Ромушкевич. – К.: ВидавництвоКиївськийУніверситет, 1972. – 140с.
9. Гейко Л.А. Оценка статистических характеристик гидротермического коэффициента на Украине / Л.А. Гейко // Труды УкрНИГМИ. – 1990. – Вып. 238. – С. 89-94.
10. Давитая Ф.Ф. Засухи в СССР и научное обоснование мер борьбы с ними

- по природным зонам / Ф.Ф. Давитая // Вопросы земледелия и борьба с эрозией почв в степных и лесостепных районах СССР. Т 1. – Саратов, 1959. – С.54-58.
11. Двумернонормальноераспределение. Лекция 7 / Курс лекций "Теория вероятностей в технических системах с использованием объектно-ориентированного подхода" в среде MATLAB, 2016 г.
 12. Інструкція гідрометеорологічним станціям (постам) про подачу інформації «про небезпечні та стихійні гідрометеорологічні явища», К., 1998 р.
 13. Карєвіна К., Костирко І., Олійник Р. Індексація метеорологічної посухи. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка - Серія Географія. 2019. № 2 (75). С. 71–77.
 14. Клімат України // За ред. В.М. Ліпінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. К.: Вид. Раєвського, 2003. – 343 с.
 15. Лобода Н.С. Шляхи визначення можливої гідрологічної посухи за метеорологічними даними в умовах змін клімату для річок північно-західного Причорномор'я / Н.С. Лобода, Ю.В. Божок // Геополітика і екогеодинаміка регіонів. – 2014. – Том 10. – Вып. 1. – С. 281-289.
 16. Платонов А.К. Методическое пособие к курсу Методы навигации в условиях неопределенности / А.К.Платонов, Д.С. Иванов // Московский Физико-технический Институт, 2013 - 84 с.
 17. Педь Д.А. Климатические особенности атмосферных засух и избыточного увлажнения / Д.А. Педь // Труды Гидрометцентра СССР. – 1975. – Вып. 156. – С. 39-76.
 18. Педь Д.А. О показателе засухи и избыточного увлажнения / Д.А. Педь // Труды Гидрометцентра СССР. – 1975. – Вып. 156. – С. 19-38.
 19. Руденко А.И. Типы засух вегетационного периода и их характеристика / А.И. Руденко // Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай / Под ред. А.И. Руденко. – Л.: Гидрометеиздат, 1958. – С.46-53.

20. Садоков В.П. Анализ летних засух 1972, 1975, 1984 и 2002 гг. / В.П. Садоков, В.Ф. Козельцева, Н.Н. Кузнецова // Труды Гидрометцентра России. – 2008. – Вып. 342. – С. 23-36.
21. Садоков В.П. Образование атмосферно-почвенной засухи с учетом почвенной и атмосферной засушливости / В.П. Садоков, В.Ф. Козельцева, Н.Н. Кузнецова // Труды Гидрометцентра России. – 2002. – Вып. 337. – С.48-56.
22. Садоков В.П. Усовершенствованные методы прогнозов атмосферной, почвенной, атмосферно-почвенной засушливости и засух / В.П. Садоков, В.Ф. Козельцева, Н.Н. Кузнецова, Т.М. Федунова // Труды Гидрометцентра России. – 2005. – Вып. 340. – С. 3-15.
23. Селянинов Г.Т. Происхождение и динамика засух / Г.Т. Селянинов // Засухи в СССР. Их происхождение, повторяемость и влияние на урожай / Под ред. А.И. Руденко. – Л.: Гидрометеиздат, 1958. – С.5-30.
24. Синицина Н.И. Агроклиматология / Н.И. Синицина, И.А. Гольцберг, Э.А. Струнников. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 342 с.
25. Татарчук О.Г., Барабаш М.Б. Дослідження просторово-часового розподілу посухов в Україні в умовах сучасного клімату. Наук. праці УкрНДГМІ, 2007, Вип. 256, с.140-154
26. Хлебникова Е.И. Засухи / Е.И. Хлебникова, Т.В. Павлова, Н.А. Сперанская // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / Под ред. С.М. Семенова. – М.: Росгидромет, НИЦ “Планета”, 2012. – С. 126-164.
27. Хохлов В.М. Про зв'язок середньорічного стоку р. Південний Буз з посухами в період 1951–2010 рр. / В.М. Хохлов, Н.С. Єрмоленко // Вісник ОДЕКУ. – 2013. – Вип.16. – С. 51-59.
28. Хохлов В.М. Просторово-часова мінливість посух в Східноєвропейському секторі в умовах глобальних змін клімату / В.М. Хохлов, Н.С. Єрмоленко // Український гідрометеорологічний журнал. – 2012. – № 11. – С.128-134.

29. Хохлов В.М. Просторово-часовий розподіл засух на території України в умовах зміни клімату / В.М. Хохлов // Український гідрометеорологічний журнал. – 2011. – № 8. – С. 38-43.
30. Хохлов В.М. Регіональні особливості розподілу посух в Україні / В.М. Хохлов, Г.О. Боровська, Г.В. Хоменко, Т.В. Шараєва // Український гідрометеорологічний журнал. – 2011. – № 9. – С. 73-78.
31. Цубербиллер Е.А. Агрометеорологическая характеристика суховеев / Е.А. Цубербиллер. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – 120с.
32. Черенкова Е.А. Засухи в Украине в ситуации влияния квазидвухлетней цикличности глобальных атмосферных процессов / Е.А. Черенкова // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014. – Том 10. – Вып. 1. – С. 938-942.
33. Швець В.Т. Теорія ймовірностей і математична статистика. Одеса: Видавництво ВМВ, 2018. 218 с.
34. Abramopoulos F. Improved ground hydrological calculations for global climate models (GCMs): Soil water movement and evapotranspiration / F. Abramopoulos, C. Rosenzweig, B. Choudhury // J. of Climate. – 1988. – Vol.1. – P. 921–941.
35. Abramowitz M. Handbook of Mathematical Functions / M. Abramowitz, I.A. Stegun. – New York: Dover Publications, 1965. – 496 p.
36. Alley W.M. Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions / W.M. Alley // J. of Climate Appl. Meteor. – 1984. – Vol. 23. – P. 1100-1109.
37. Cherenkova E.A. Summer drought 2010 in the European Russia / E.A. Cherenkova, N.K. Kononova, N.R. Muratova // Geography, Environmental, Sustainability. – 2013. – № 1 (6). – P.55-65.
38. Dai A. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming / A. Dai, K.E. Trenberth, T. Qian // J. of Hydrometeorology. – 2004. – Vol. 5. – P.1117-1130.
39. Dai A. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index

- (PDSI) during 1900-2008 / A. Dai // *J. Geophys. Res.* – 2011. – Vol. 116. – No. D12. DOI:10.1029/2010JD015541.
40. Lloyd-Hughes B. A droughtclimatologyforEurope / B. Lloyd-Hughes, M.A. Saunders // *Int. J. Climatology.* – 2002. – Vol. 22, No. 13. – P.1571-1592.
41. McKeeT.B.The relationship of drought frequency and duration to time scales/ T.B. McKee, N.J. Doesken, J. Kliest // *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology.* – Anaheim, USA, 1993. – P. 179-184.
42. Palmer W.C. Meteorological droughts / W.C. Palmer. – U.S. Department of Commerce Weather Bureau, 1965. – Research Paper 45. – 58p.
43. Penman H.L. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass / H.L. Penman // *Proc. R. Soc. London., Ser. A.* – 1948. – Vol. 193. – P.120-145.
44. Semenova I. On use of drought indices in modeling hydrological processes / I. Semenova, V. Ovcharuk, J. Shakhirzanova // *Conference Proceedings SGEM 2014. Geoconference on Water Resources: Hydrology and Water Resources, 17-26 June 2014.* – Albena, 2014. – Vol. 1. – P. 503-510. DOI: 10.5593/SGEM2014/B31/S12.065.
45. Thornthwaite C.W. An approach toward a rational classification of climate/ C.W. Thornthwaite // *Geogr. Revew.* – 1948. – Vol. 38. – P. 55-94.
46. Thornthwaite C.W.
 Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance / C.W. Thornthwaite, J.R. Mather // *Publications in Climatology.* – Laboratory of Climatology, Drexel Institute of Technology, Centerton, New Jersey, USA, 1957. – No. 10 (3). – P. 183 – 311.
47. Vicente-Serrano S.M. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index/S.M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J.I. López-Moreno // *J. of Climate.* – 2010. – Vol. 23, No. 7. – P.1696–1718.
48. Vicente-Serrano S.M. A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscale drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Inde

- x/ S.M.Vicente-Serrano, S. Beguería, J.I. López-Moreno [etal.] // J. ofHydrometeorology. – 2010. – Vol. 11. – P. 1033-1043.
49. WellsN.Aself-calibratingPalmerDroughtSeverityIndex/N.Wells,S. Goddard, M.J. Hayes // J. ofClimate. 2004. – Vol. 17. – P. 2335-2351.
50. WMO (2009). Expertsagreeon a universaldroughtindextocopewithclimaterisk [Электронный ресурс] // PressRelease. – 2009. – No. 872. – Режим доступа:http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_872_en.html.
51. YadolahDodge (2003) TheOxforddictionaryofstatisticalterms. TheInternationalStatisticalInstitute, 498 p.

ДОДАТКИ

Додаток А
Таблиця А.1

Індекси посухи референтного періоду 1981-2010 рр. для календарного літа м. Київ

Рік	Червень								Липень								Серпень							
	AI	PNI	SPI	SPEI	HTC	Ped	DI	RAI	AI	PNI	SPI	SPEI	HTC	Ped	DI	RAI	AI	PNI	SPI	SPEI	HTC	Ped	DI	RAI
1981	0,41	50,80%	-0,76	-1,08	0,76	2,39	2	-2,52	0,9	146,40%	1,05	1,05	1,6	-1,05	9	3,24	0,43	77,70%	-0,07	0,1	0,85	0,73	4	-1,12
1982	0,77	78,40%	-0,13	0,11	1,45	-0,78	5	-0,55	1,08	157,80%	1,21	1,59	1,93	-2,63	10	4,04	0,55	99,50%	0,29	0,45	1,03	-0,8	6	-0,02
1983	0,6	64,20%	-0,43	-0,32	1,11	0,31	3	-1,56	0,29	45,10%	-1,04	-0,78	0,53	0,71	2	-3,84	0,37	68,70%	-0,25	-0,18	0,73	-0,03	4	-1,58
1984	1,52	145,70%	0,92	1,17	2,89	-3,23	9	4,26	0,72	103,40%	0,34	0,58	1,34	-1,75	6	0,24	0,07	12,80%	-2,08	-1,15	0,14	-0,13	1	-4,4
1985	0,89	87,60%	0,04	0,34	1,64	-1,21	6	0,11	1	140,10%	0,96	1,36	1,77	-2,57	8	2,81	0,24	48,70%	-0,69	-0,75	0,47	-0,28	3	-2,59
1986	0,92	100,70%	0,27	0,38	1,66	0,18	7	1,04	0,81	128,80%	0,78	0,75	1,54	-1,34	8	2,02	0,93	179,20%	1,3	1,29	1,8	-2,33	9	3,99
1987	0,65	69,30%	-0,32	-0,18	1,21	-0,07	4	-1,2	0,55	90,70%	0,1	-0,13	1,02	0,19	5	-0,65	0,82	135,40%	0,79	1,13	1,66	0,81	8	1,79
1988	1,1	108,40%	0,39	0,68	1,86	-1,14	8	1,59	0,47	77,60%	-0,18	-0,39	0,82	1,04	3	-1,56	0,67	122,00%	0,62	0,72	1,33	0,58	8	1,11
1989	1,48	168,50%	1,2	1,22	2,71	-1,57	10	5,88	0,59	90,30%	0,09	0,09	1,07	-0,52	4	-0,68	0,46	87,20%	0,09	0,1	0,9	-0,47	6	-0,65
1990	0,82	80,20%	-0,1	0,21	1,5	-1,03	5	-0,42	0,45	69,40%	-0,37	-0,34	0,85	-0,19	2	-2,14	0,53	102,70%	0,34	0,32	1,1	-1,24	7	0,14
1991	0,92	101,20%	0,27	0,39	1,71	-0,39	8	1,08	0,55	87,40%	0,03	-0,06	0,94	0,42	4	-0,88	0,48	86,10%	0,07	0,27	0,91	0,98	5	-0,7
1992	0,32	30,00%	-1,27	-1,28	0,5	1,65	2	-4	0,51	86,70%	0,02	-0,32	0,97	0,53	3	-0,93	0,24	56,20%	-0,51	-1,13	0,49	0,44	3	-2,21
1993	0,88	90,80%	0,1	0,32	1,71	-1,15	7	0,34	1	150,00%	1,1	1,35	1,9	-2,53	9	3,5	0,48	85,30%	0,06	0,24	0,98	-1,28	5	-0,74
1994	0,95	91,60%	0,11	0,45	1,78	-1,68	7	0,39	0,56	91,40%	0,12	-0,06	1	0,27	5	-0,6	0,65	119,40%	0,58	0,67	1,25	-0,03	7	0,98
1995	0,48	56,60%	-0,61	-0,78	0,88	1,73	3	-2,1	0,53	87,70%	0,04	-0,17	0,98	0,27	4	-0,86	0,58	118,30%	0,57	0,39	1,2	-0,4	7	0,93
1996	0,66	76,30%	-0,18	-0,25	1,28	0,61	5	-0,7	0,6	98,20%	0,25	0,03	1,16	-0,33	6	-0,12	0,38	72,20%	-0,18	-0,18	0,76	-0,47	4	-1,4
1997	0,84	89,60%	0,07	0,24	1,54	-0,35	6	0,25	0,86	128,60%	0,78	0,95	1,49	-1,38	8	2	0,3	55,50%	-0,53	-0,31	0,58	0,65	3	-2,25
1998	0,56	65,40%	-0,4	-0,5	1,05	1,2	3	-1,48	0,8	122,20%	0,67	0,75	1,43	-1,22	7	1,55	0,51	91,20%	0,16	0,32	1,01	-0,27	6	-0,45
1999	0,37	48,70%	-0,81	-1,37	0,69	3,22	2	-2,67	0,67	112,80%	0,51	0,26	1,15	0,5	6	0,9	1,14	209,20%	1,6	1,67	2,2	-0,42	10	5,51
2000	0,61	67,60%	-0,36	-0,32	1,2	0,17	4	-1,33	0,74	114,20%	0,54	0,55	1,37	-1,11	7	1	0,15	31,00%	-1,22	-1,15	0,3	0,34	2	-3,48
2001	1,6	158,10%	1,08	1,26	2,96	-3,04	10	5,14	0,04	8,10%	-3,08	-1,82	0,08	4,55	1	-6,43	0,12	25,90%	-1,41	-1,31	0,25	3,49	1	-3,74
2002	1,22	131,60%	0,67	0,85	2,29	-1,64	10	7,92	0,1	19,30%	-2,15	-1,67	0,19	3,98	1	-5,64	1,21	235,20%	1,84	1,8	2,36	-0,53	10	6,83
2003	0,24	26,90%	-1,54	-1,42	0,47	1,27	1	-4,23	0,51	84,50%	-0,03	-0,28	0,91	0,73	3	-1,09	1,06	198,00%	1,49	1,54	2,08	-1,14	9	4,94
2004	0,06	6,80%	-2,86	-2,05	0,12	1,54	1	-5,67	0,94	156,50%	1,19	1,18	1,76	-1,4	10	3,96	1,08	205,70%	1,57	1,58	2,05	-1,99	10	5,33
2005	1,11	115,70%	0,5	0,7	2,11	-1,48	9	2,11	0,23	40,60%	-1,19	-1,21	0,43	2,16	1	-4,15	0,7	136,00%	0,8	0,76	1,36	-0,43	8	1,82
2006	1,17	124,10%	0,63	0,79	2,15	-1,29	9	2,71	0,54	94,80%	0,18	-0,23	1,03	0,62	5	-0,37	0,43	82,20%	0,01	-0,01	0,83	0,33	5	-0,9
2007	0,73	87,90%	0,04	-0,09	1,37	1,08	6	0,13	0,87	153,60%	1,15	0,91	1,64	-0,66	10	3,75	0,73	152,00%	1	0,81	1,42	-0,64	9	2,62
2008	0,92	103,80%	0,32	0,38	1,77	-0,36	8	1,26	0,69	116,70%	0,58	0,34	1,29	-0,22	7	1,17	0,19	43,30%	-0,84	-1,24	0,4	0,98	2	-2,86
2009	0,53	65,90%	-0,39	-0,71	1,02	1,8	4	-1,44	0,31	52,50%	-0,81	-0,92	0,55	1,81	2	-3,33	0,12	24,80%	-1,45	-1,17	0,26	2,01	1	-3,79
2010	0,2	25,70%	-1,59	-2,08	0,37	3,51	2	-4,32	0,74	144,40%	1,02	0,37	1,35	1,15	9	3,11	0,16	38,70%	-0,97	-1,73	0,31	3,14	2	-3,09