

А.В. Сидоренко, В.І. Затула

## **ОСОБЛИВОСТІ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ СТРУКТУРИ ПОЛІВ ДЕФІЦИТУ НАСИЧЕННЯ ТА ЇХ ЗВ'ЯЗОК З ПІВНІЧНОАТЛАНТИЧНИМ КОЛИВАННЯМ В УМОВАХ СУЧАСНОГО КЛІМАТУ УКРАЇНИ**

Проаналізовано тренди місячних рядів середнього дефіциту насичення, оцінено залежності величини дефіциту насичення від висоти над рівнем моря, широти та довготи місцевості, охарактеризовано періодичні коливання місячних величин середнього дефіциту насичення, проведено оцінку впливу Північно-Атлантичного коливання на розподіл полів дефіциту насичення.

**Ключові слова:** дефіцит насичення, сучасні зміни клімату, особливості полів дефіциту насичення, просторові градієнти, аналогічність полів, Північноатлантичне коливання.

### **Вступ**

Дефіцит насичення – комплексна функція температури та вологості повітря, вивченню якої в останні кілька десятиліть приділялося недостатньо уваги. Однак, важливість вивчення дефіциту насичення не викликає сумнівів, адже ця величина слугує показником масштабів можливої випаровуваності в певних умовах і є дуже важливою характеристикою для вирішення багатьох інших питань, пов'язаних з випаровуванням. Дефіцит насичення входить у багато формул для обчислення вологозабезпечення території, випаровування та випаровуваності, застосовується для виявлення атмосферної посухи та суховіїв тощо.

Вивченням кліматологічних характеристик дефіциту насичення повітря займалось чимало дослідників, зокрема й за кордоном. Так, значний внесок у вивчення кліматологічних характеристик дефіциту насичення для значної території колишнього Радянського Союзу зробила Є.М. Соколова ще в 1937 р. [10]. Просторово-часовий розподіл, зв'язки з окремими метеорологічними елементами досліджували К.І. Кашин, М.В. Гриценко, О.А. Каменська, Х. Унгехейер, В. Дамман, Є. Хоендорф, З. Вербіцкі, С. Кветак та ін. [4, 5, 12-16]. В Україні вивченням деяких

аспектів дефіциту насичення займалися в УкрНДГМІ Є.М. Кіптенко та Т.В. Козленко, результати роботи яких опубліковано в монографії “Клімат України” [6]. Дослідження показали, що останнім часом не було ґрунтовних робіт, присвячених цій метеорологічній величині. Тож вивчення сучасних тенденцій формування полів дефіциту насичення в їх зв’язку зі зміною кліматичних умов є дуже важливим та актуальним.

**Метою** дослідження є розширення теоретичних знань про просторово-часовий розподіл дефіциту насичення в умовах сучасних змін клімату, а також виявлення статистично значущих залежностей між дефіцитом насичення та іншими метеорологічними величинами, а також фізичними чинниками, що його визначають.

### **Матеріали та методи досліджень**

Під час виконання дослідження застосовувались такі методи статистичного та кліматологічного опрацювання інформації: регресійний, кореляційний аналіз, метод моделювання, гармонійний аналіз, метод визначення ступеня аналогічності полів тощо. Вихідна інформація для дослідження – дані спостережень за дефіцитом насичення по 180 метеостанціях України за період з 1991 р. по 2008 р., “Кліматичний кадастр України” [7], середньомісячні дані Північноатлантичного коливання (далі – ПАК) [11] тощо.

### **Основні результати досліджень**

Особливості просторово-часового ходу дефіциту насичення зазвичай пов’язують із ходом температури. Дослідження, проведені в УкрНДГМІ, показали, що наприкінці ХХ та на початку ХХІ ст. клімат України став теплішим на 0,7-1,6 °С [2]. Для розширення теоретичних знань про зв’язки дефіциту насичення з іншими метеорологічними величинами та глибшого розуміння особливостей його просторово-часового ходу було проведено дослідження наявності залежності між метеорологічними величинами “температура-кількість опадів-дефіцит насичення”. Із отриманих результатів можна стверджувати про наявність зв’язку між температурою та дефіцитом насичення повітря. Отже, в дні без опадів, у Луганську та Полтаві тіснота зв’язків у середньому за рік становила 0,81-0,85. Якщо включати в обчислення дні з опадами, то тіснота зв’язків зменшується до 0,81-0,82. Отже, в дні, коли є опади,

зв'язки між досліджуваними метеорологічними величинами послаблюються.

У межах вивчення просторово-часового розподілу було досліджено особливості річного ходу дефіциту насичення, виділено мінімуми та максимуми, вивчено амплітуди, роки з найменшими та найбільшими значеннями, охарактеризовано мінливість величини, побудовано карти розподілу величини в січні, липні та в теплий період року [10-12]. Виявлено чітку закономірність у збільшенні величини з північного заходу на південний схід. Розподіл середнього річного дефіциту насичення в Україні (рис. 1) добре узгоджується з фізико-географічними зонами, зокрема на рівнинній частині території країни межі лісостепу та степу дуже близькі до ізоліній 4 та 5 гПа.

Проведено дослідження режиму дефіциту насичення в горах. Результати показують, що на передгірних станціях значення дефіциту насичення зазвичай вищі, ніж в горах, найбільші контрасти спостерігаються влітку і сягають 3-6 гПа у липні; у холодну пору року дефіцит насичення може бути вищим на гірських станціях порівняно з рівнинними.

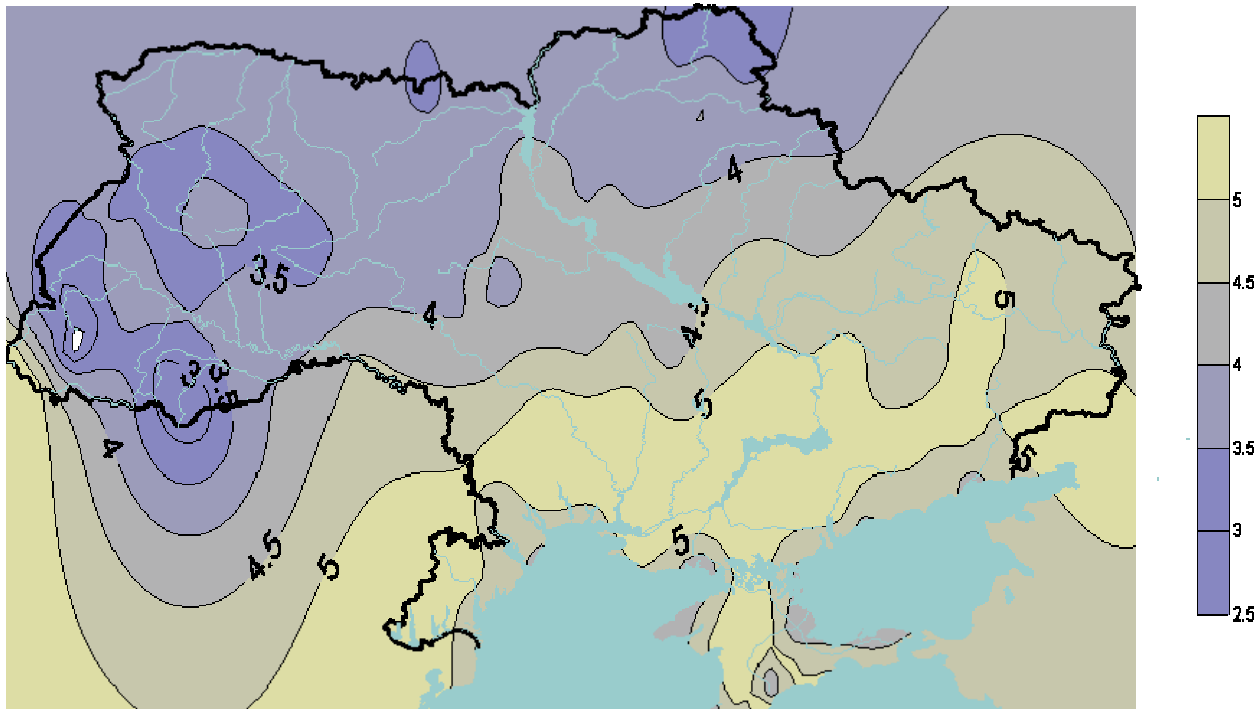


Рис. 1. Середній річний дефіцит насичення в Україні, гПа

Експозиція гірської системи впливає на розподіл дефіциту насичення, зокрема на північно-східному схилі Українських Карпат річні контрасти дефіциту насичення майже вдвічі нижчі, ніж на південно-західному.

У Криму протягом року зміна величин дефіциту насичення в системі “гора – підніжжя” коливається в межах 0,5-5,7 гПа, причому максимальна різниця спостерігається в серпні. Виявлено тісний кореляційний зв'язок між дефіцитом насичення та абсолютною висотою в період з лютого по жовтень ( $r = -0,58 \dots -0,84$ ). Вертикальні градієнти дефіциту насичення в теплий період року коливаються від 0,08 до 0,36 гПа/100м.

Вивчено залежність дефіциту насичення від висоти місцевості над рівнем моря та географічного положення окремо для гірських та рівнинних регіонів. З цією метою використовувався метод моделювання [2]. Для обчислення градієнтів було використано середні річні дані з дефіциту насичення повітря по 180 метеостанціях України. Згідно зі схемою фізико-географічного районування, гірські регіони було виділено окремо від рівнинних.

Для визначення залежності метеовеличини  $d$  від висоти ландшафтів над рівнем моря ( $h$ ) і географічного положення (широти  $\varphi$  та довготи  $\lambda$ ) було взято методику, яку використовували С.Г. Бойченко та Н.Н. Сердюченко [2] для моделювання полів температури та опадів. За допомогою даної моделі дефіцит насичення у визначений момент часу ( $t$ ) в межах досліджуваного регіону представлявся у вигляді функції:

$$d(t, \varphi, \lambda, h) \approx d_0(t) + \gamma_\varphi(t)(\varphi - \varphi_0) + \gamma_\lambda(t)(\lambda - \lambda_0) + \gamma_h(t)(h - h_0) \quad (1)$$

Складові градієнти дефіциту насичення оцінювалися традиційним способом – за допомогою методу найменших квадратів. Першу групу склали 158 метеорологічних станцій рівнинної частини України; другу – 22 метеорологічні станції Українських Карпат, Прикарпаття та Закарпаття.

За результатами обчислень для рівнинної та гірської частин території України отримано такі просторові градієнти дефіциту насичення повітря (рис. 2):

$\gamma_h = -0,07$  гПа/100м;  $\gamma_\varphi = -0,169$  гПа/1°;  $\gamma_\lambda = 0,065$  гПа/1° – середні значення градієнтів для рівнинної території України та

$\gamma_h = -0,18$  гПа/100м;  $\gamma_\varphi = -0,49$  гПа/1°;  $\gamma_\lambda = 0,09$  гПа/1° – для гірської.

Таким чином, дефіцит насичення зростає зі зменшенням широти (тобто в напрямку на південь, де жаркіше і де насправді його значення більші) зі швидкістю близько  $0,17 \text{ гПа}/1^\circ$  та з просуванням на схід, де сухіше, із швидкістю  $0,07 \text{ гПа}/1^\circ$ .

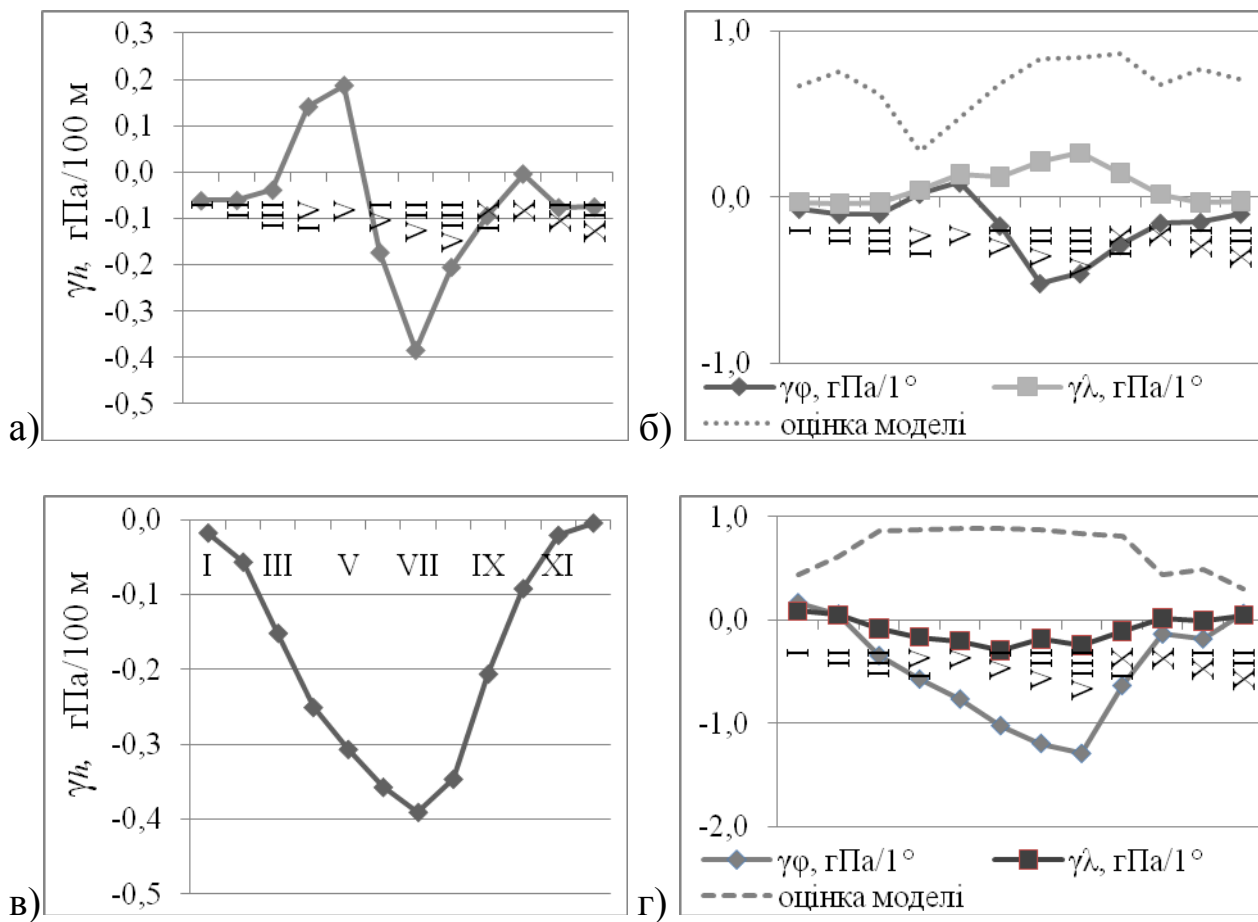


Рис. 2. Річний хід просторових градієнтів дефіциту насичення для території України. Вертикальний градієнт: а) рівнинна територія, в) гірська територія України; градієнт по широті, довготі та оцінка достовірності всіх градієнтів: б) рівнинна територія, г) гірська територія

Аналіз показав, що для гірських регіонів застосування цього методу є особливо ефективним у період з березня по вересень (модель описує понад 80 % заданих станцій), а в холодну пору року зазначені цифри значно нижчі. Для рівнинної території України найвища достовірність моделі досягається в липні – вересні, найменша – у квітні.

Зіставлення середніх даних дефіциту насичення кліматологічної стандартної норми за 30-річний період (1961-1990 рр.) із сучасними (1991-2008 рр.) дозволило оцінити зміни величини в сучасних умовах

зміни клімату (рис. 3). Виявлено зміни середнього дефіциту насичення повітря порівняно з кліматологічною стандартною нормою. Згідно з цим рисунком, на більшій частині території країни показник зріс, причому найбільше в північних та північно-західних регіонах, а в східних, частково південних та центральних областях дефіцит насичення або не змінився, або зменшився; у січні-серпні та в жовтні показник у більшості випадків збільшився, у вересні зменшився, а в листопаді та грудні не змінився; порівняння даних добового ходу виявили зростання дефіциту насичення в максимумі на всіх досліджуваних станціях на 0,1...0,7 гПа.

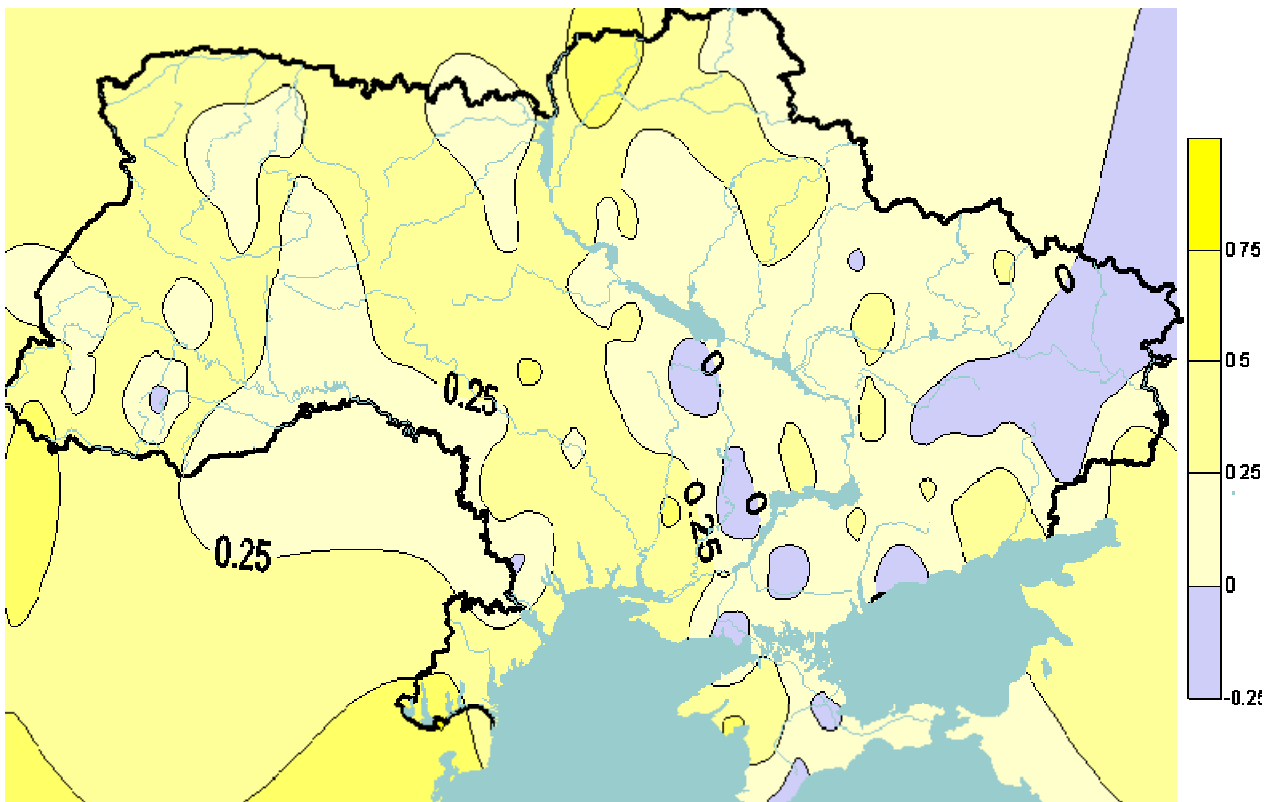


Рис. 3. Зміна середнього дефіциту насичення

Зіставлялися не тільки фактичні значення дефіциту насичення, а також і його детерміновані зміни, – тренди. Для порівняння напряму та інтенсивності таких змін здійснювалась апроксимація відповідних часових рядів лінійною функцією виду  $\hat{d}_t = at + b$ , де  $\hat{d}_t$  – оцінка дефіциту насичення (гПа),  $t$  – порядковий номер місяця;  $a$  – коефіцієнт лінійного тренду;  $b$  – деяка стала, що відповідає точці перетину лінії регресії з віссю ординат, по якій відкладаються значення  $\hat{d}_t$  [4]. Таке зіставлення було проведено для рядів дефіциту насичення на

25 метеорологічних станціях, розміщених в обласних центрах країни (рис. 4). У ході аналізу виявлено, що в Україні намітилася тенденція до зростання середнього дефіциту насичення, але достовірність такої апроксимації на всіх метеорологічних станціях недостатня.

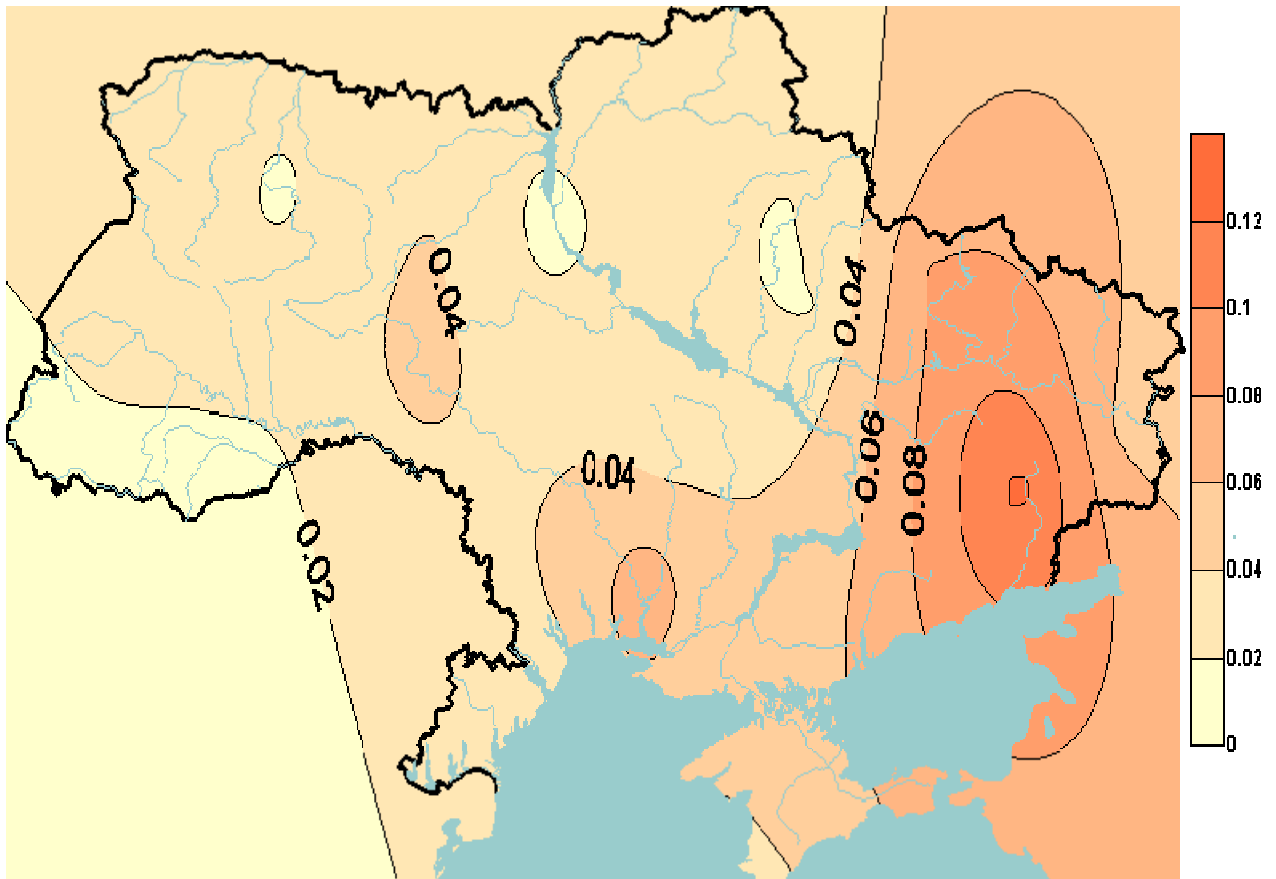


Рис. 4. Коефіцієнт лінійного тренду дефіциту насичення повітря за рік, гПа

На більшості станцій абсолютне значення коефіцієнта лінійного тренду за місяць вельми незначне. Серед досліджуваних станцій виділяються Харків, Миколаїв і Донецьк. Найменші величини коефіцієнта лінійного тренду на станціях Пожежевська та Ужгород, Плай, Чернівці, Полтава, Київ, Рівне, Суми тощо. Результати апроксимації дещо суперечать дослідженням, представленим на рис. 3. Це пояснюється проведенням апроксимації по обласних центрах, які активно розбудовуються та мають так званий “острів тепла”. У загальному простежується тенденція до збільшення величин лінійного тренду з північного заходу на південний схід, що підтверджує проведені нами раніше дослідження та вказує на аридизацію клімату України, зокрема на південному сході.

Для виділення періодичних коливань середнього дефіциту насичення повітря застосовано апарат гармонічного аналізу [9]. Оцінки параметрів річної гармоніки для середнього дефіциту насичення в розрізі окремих метеорологічних станцій України показали, що річним ходом пояснюється від 59,3 до 83,9 % загальної дисперсії місячних рядів середнього дефіциту насичення повітря. Середнє значення внеску річної гармоніки в загальну дисперсію місячних рядів по досліджуваних 27 станціях України перевищує 76 %. Сумарна оцінка внеску довго- та короткоперіодних коливань показує, що для полів дефіциту насичення, крім річних коливань, краще виражені коливання з коротким періодом (до 12 місяців). Так, серед досліджуваних станцій їх внесок становив у середньому 16,3 % від дисперсії рядів. Внесок коливань із періодом більш як рік є меншим і становить у середньому близько 8 %.

Використавши результати обчислень у ході проведення гармонічного аналізу запропоновано нескладну статистичну модель динаміки середнього місячного дефіциту насичення [9]:

$$\hat{d}_t = at + b + A_1 \sin\left(\frac{\pi t}{6}\right) + B_1 \cos\left(\frac{\pi t}{6}\right), \quad (2)$$

де  $t$  – порядковий номер місяця, що відраховується від січня 1991 р.

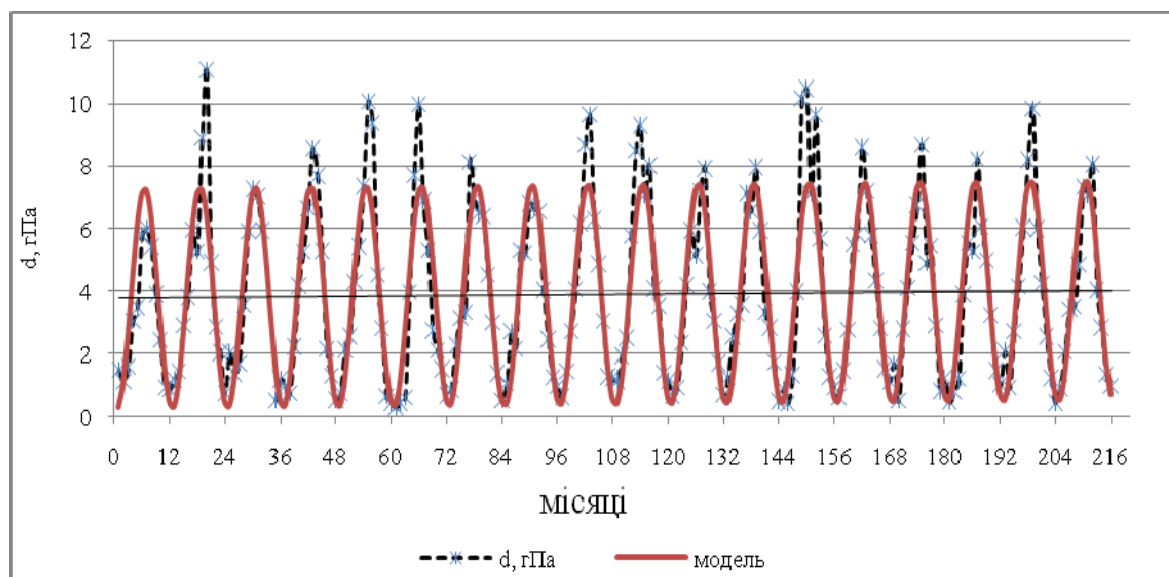


Рис. 5. Моделювання середнього місячного дефіциту насичення. Ст. Чернівці



Результати показали, що в цілому застосування моделі для опису динаміки середнього місячного дефіциту насичення є досить ефективним. Середнє значення достовірності апроксимації цією моделлю для вибраних метеорологічних станцій України становить 0,80. Найвища достовірність апроксимації досягається на станціях Чернівці (рис. 5), Чернігів, Луцьк, Рівне, Житомир, Львів, Тернопіль і становить понад 0,84.

Для виявлення найбільш схожих та відмінних років спостережень зі стандартною кліматологічною нормою було проведено дослідження аналогічності полів дефіциту насичення. У роботі використано методику обчислення числового показника для оцінки ступеня схожості полів метеорологічних величин, що детальніше описано в [1].

Вивчення річного ходу характеристик аналогічності дозволить визначити місяці та роки, в які поля дефіциту насичення характеризувалися підвищеною (порівняно з кліматологічною нормою) мінливістю, а також виявити характерні тенденції зміни полів метеорологічних величин протягом року. Так, на рис. 6 та 7 зображено частоту випадків з аналогічними полями (річний та багаторічний хід).

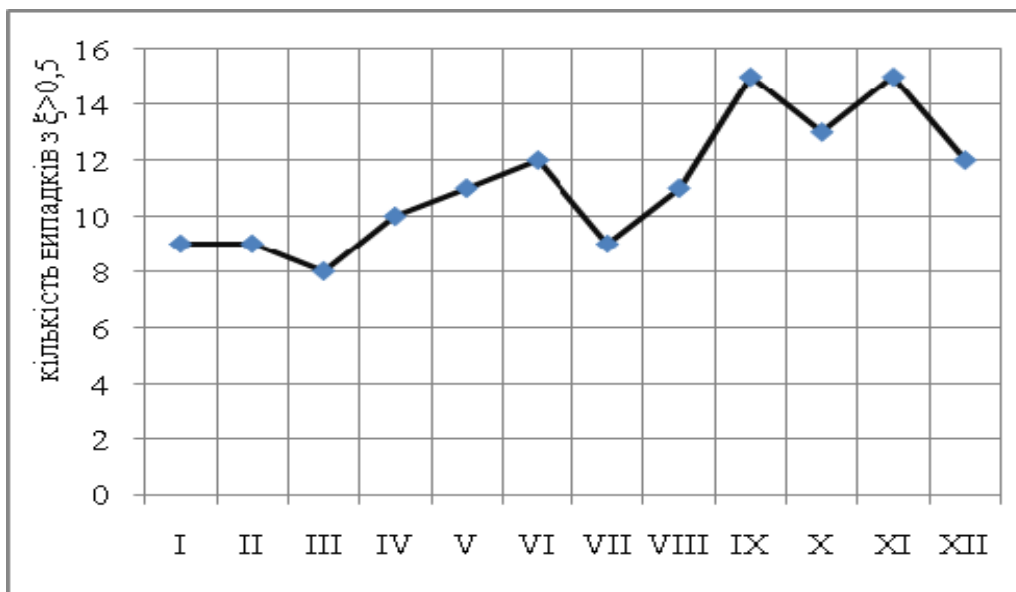


Рис. 6. Річний хід випадків з аналогічними полями

Результати проведених обчислень показують, що в разі порівняння середніх місячних даних дефіциту насичення за 1991-2008 рр. з кліматологічною стандартною нормою 1961-1990 рр. (рис. 6), найбільше випадків з коефіцієнтом аналогічності  $\xi \geq 0,5$  буває в червні, а також з вересня по грудень (від 67 % до 83 % серед загального числа реалізацій).

Найменше число збігу припадає на період з січня по березень та липень. Тобто в контексті сучасних кліматичних змін поля дефіциту насичення найбільше відмінні від кліматологічної норми в ці місяці, а з вересня по грудень та в липні поля досліджуваної метеорологічної величини суттєво не змінилися. Під час вивчення міжрічної динаміки коефіцієнта аналогічності простежується тенденція до зменшення подібності полів дефіциту насичення зі швидкістю приблизно 1,5 % на рік (рис. 7).

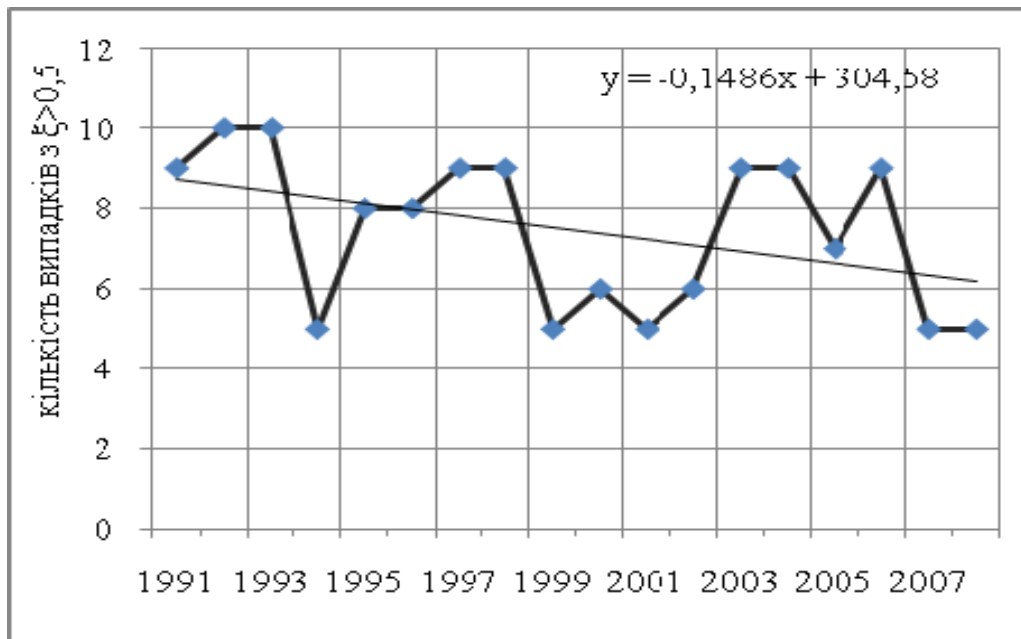


Рис. 7. Багаторічний хід випадків з аналогічними полями

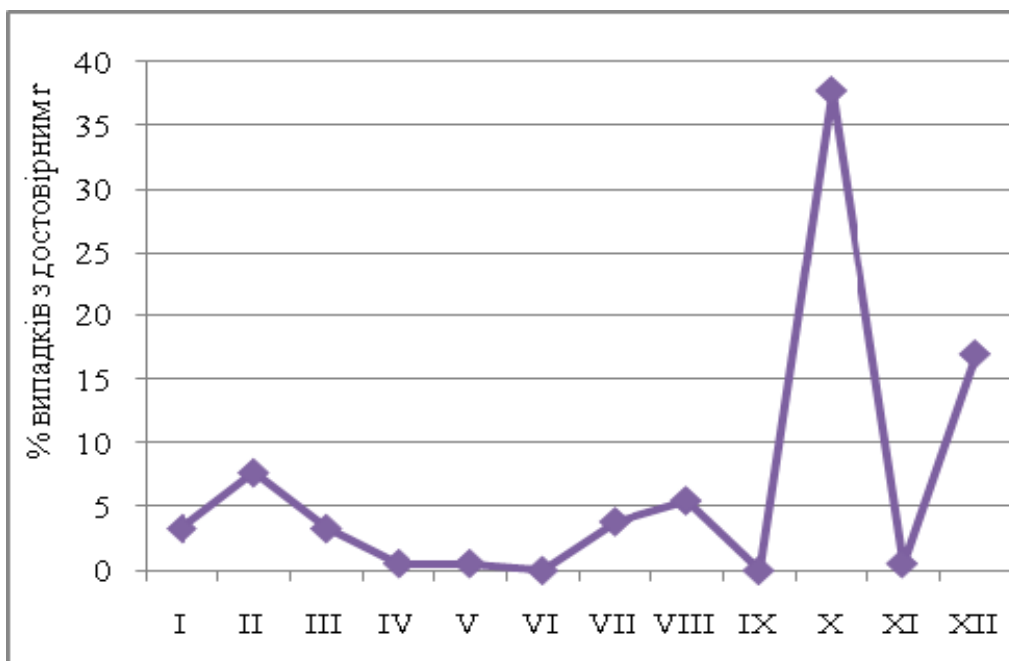


Рис. 8. Річний хід зв'язку між дефіцитом насичення та ПАК, %

Проведено дослідження щодо наявності зв'язку між середніми місячними значення ПАК і дефіцитом насичення повітря на окремих метеорологічних станціях.

Як видно з рис. 8, найтіснішим є зв'язок між заданими величинами в жовтні (коефіцієнт кореляції достовірний у 38 % станцій) та в грудні (17 %). У решту місяців відсоток станцій з достовірною кореляцією дуже малий, що слід розцінювати як відсутність зв'язку.

Аналіз коефіцієнта аналогічності полів дефіциту насичення доповнено оцінкою відхилень значень осциляції ПАК за 1991-2008 рр. від її кліматологічної стандартної норми (рис. 9). У результаті аналізу встановлено, що в більшості місяців року між величинами була від'ємна кореляція; тіснота кореляційного зв'язку виявилась значущою лише в жовтні, коефіцієнт кореляції дорівнював  $-0,59$  за похибки  $0,15$ .

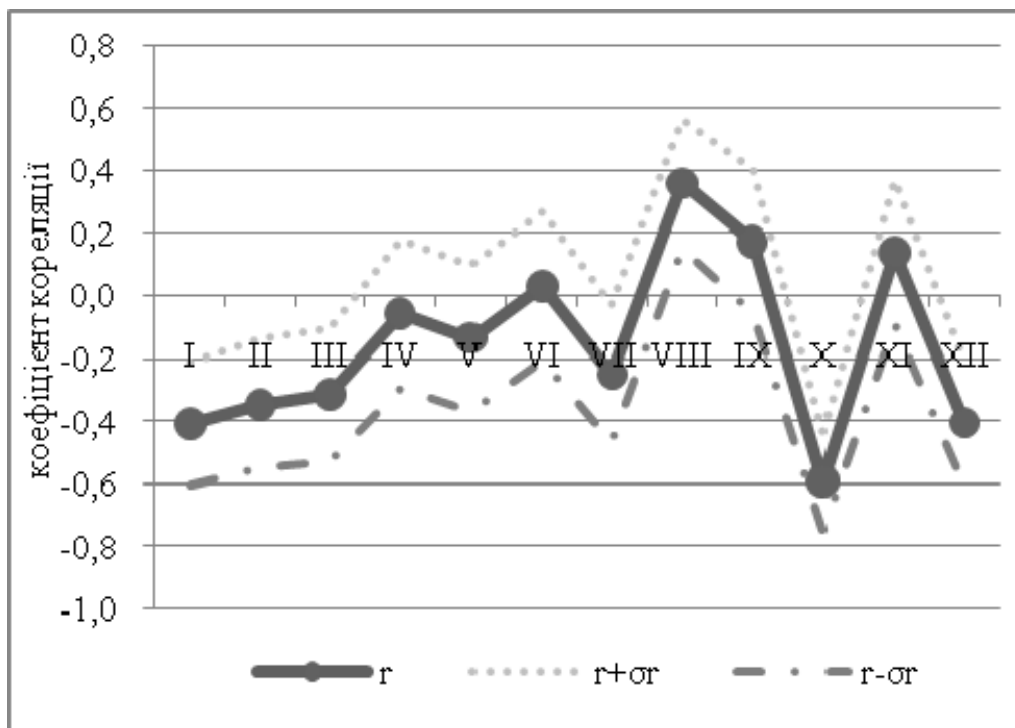


Рис. 9. Річний хід тісноти кореляційного зв'язку між коефіцієнтом аналогічності та відхиленням від норми ПАК

Вивчення тісноти зв'язків для багаторічного ходу дозволило виявити, що серед досліджуваного періоду виявлено лише три роки, в які кореляційні зв'язки були значущими; серед випадків із тісним кореляційним зв'язком усі – з оберненим характером залежності, тобто,

коли ПАК відхиляється від норми у від'ємний бік, поля дефіциту насичення є дуже близькими до кліматологічної стандартної норми.

### **Висновки**

Отже, реалізовано комплексний підхід до вивчення дефіциту насичення, що дозволило вирішити поставлені завдання та отримати низку важливих результатів:

1. Підтверджено, що між дефіцитом насичення та температурою повітря існує тісний зв'язок (коефіцієнт кореляції перевищує 0,8), який значною мірою залежить від пори року й місцевих умов та посилюється в дні, коли відсутні опади.

2. Оцінено ефективність статистичної моделі розподілу дефіциту насичення залежно від висоти над рівнем моря, широти та довготи місцевості, невідомі коефіцієнти якої визначалися за допомогою методу найменших квадратів. Встановлено, що така модель належним чином описує поля розглядуваної метеорологічної величини для всіх місяців року як для рівнинної, так і для гірської території України.

3. Порівняння сучасних значень дефіциту насичення з кліматологічною стандартною нормою в добовому ході показало зростання дефіциту насичення в максимумі на всіх досліджуваних станціях на 0,1...0,7 гПа, причому на більшій частині території країни, особливо в північних та північно-західних регіонах, дефіцит насичення зріс. У східних, частково південних та центральних областях дефіцит насичення або не змінився, або зменшився. В Україні намітилася тенденція до зростання середнього дефіциту насичення. Однак, достовірність такої апроксимації на всіх метеорологічних станціях недостатня. Просторовий розподіл коефіцієнтів цих трендів може слугувати ілюстрацією процесу аридизації сучасного клімату України.

4. Застосування методики оцінки ступеня подібності полів для значень дефіциту насичення повітря дозволило встановити, що сучасні поля дефіциту насичення найбільше відрізняються від кліматологічної стандартної норми в червні, а також з вересня по грудень (від 67 % до 83 % серед загального числа реалізацій), а в період з січня по березень, а також у липні поля досліджуваної метеорологічної величини суттєво не змінилися. Вивчення міжрічної динаміки коефіцієнта аналогічності виявило тенденцію до зменшення подібності полів дефіциту насичення зі швидкістю приблизно 1,5 % на рік.

5. Застосування гармонійного аналізу для виявлення прихованих періодичностей у структурі місячних рядів дефіциту насичення показало, що річним ходом пояснюється від 59,3 до 83,9 % загальної дисперсії метеорологічної величини. Коливання з коротким періодом (до 12 місяців) відповідальні в середньому за 16,3 % загальної дисперсії і в цілому перевищують внесок довгоперіодних (понад 12 міс.) коливань.

6. Дослідження зв'язку між коефіцієнтом аналогічності полів дефіциту насичення та ПАК показало, що в річному ході зв'язку значення коефіцієнта аналогічності тільки в жовтні визначається відхиленням параметра циркуляції від норми.

\* \*

1. *Багров Н.А., Карпеев Г.А., Катин Ю.Е., Орлова И.И.* Об аналогичности полей месячного количества осадков / Тр. Гидрометцентра СССР. – Л.: Гидрометеиздат. – 1969, Вып.44. – С. 37-52.
2. *Бойченко С.Г., Сердюченко Н.Н.* Оценка зависимости параметров региональных климатических полей от высоты местности над уровнем моря / Геофизич. журн. – №5, Т. 27. – 2005. – С. 857-866.
3. Дати переходу температури повітря в Україні за сучасних умов клімату / *За ред. В.І. Осадчого, В.М. Бабіченко.* – К.: Ніка-Центр. – 2010. – 304 с.
4. *Исаев А.А.* Статистика в метеорологии и климатологии. – М.: Изд МГУ. – 1988. – 248с.
5. *Каменская О.А.* К вопросу о распределении дефицита влажности в атмосфере / Тр. Ленинград. гидрометеоролог. ин-та. – 1961. – Вып. 12. – С. 121-127.
6. *Кашин К.И., Гриценко М.В.* Связь температуры воздуха с дефицитом влажности / Метеорология и гидрология. – 195, №5. – С. 29-33.
7. Клімат України / *За ред. В.М. Липінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко.* – К.: Вид-во Раєвського. – 2003. – 343с.
8. Кліматичний Кадастр України (електрон. версія) Держ. гідрометеоролог. служба. УкрНДГМІ. ЦГО. – К. – 2006.
9. *Пановский Г.А., Брайер Г.В.* Статистические методы в метеорологии – Л.: Гидрометеиздат. – 1967. – 242с.
10. *Продан А.В.* Просторово-часовий розподіл та динаміка дефіциту насичення в теплий період року на території України / Фізична географія та геоморфологія: міжвідомч. наук. зб. – Вип. 2(59). – К.: ВГЛ “Обрії”. – 2010. – С. 75-79.

11. *Сидоренко А.В.* Особливості просторово-часового розподілу дефіциту насичення на території України / Шевченківська весна: ІХ міжнар. міждисциплінарна наук.-практ. конф. молодих учених, 21-25 тр. 2011р.: тези доп. – К. 2011. – С 208-210.
12. *Сидоренко А.В.* Особливості розподілу дефіциту насичення в горах / Ученые зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Серия “География”. – Сімф., 2011. – Т.24(63). – № 2. – Ч. 3. – С. 334-338.
13. *Соколова Е.М.* Недостаток насыщения влагой воздуха на территории СССР / Тр. госуд. гидролог. ин-та. – Вып. 4. – 1937. – 82с.
14. Climatic Research Unit. School of Environmental Sciences. [Електрон.ресурс] Pressure and circulation indices. North Atlantic Oscillation data / <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/nao/>
15. *Damman W.* Zur Klimatologie des Sättigungs Defizits / W. Damman // Ann. Meteorol. – 1953/54. – 6. – №9/10. – P. 271-282.
16. *Hohendori E.* Nidosyty wilgotnosci powietrza w Polsce w latach 1881 – 1939 / E. Hohendori // Roczn. Nauk roln. – 1059. – F 73. – №3. – 413-483.
17. *Kvetak S.* Premenlivost sutostneho doplnku v Hurbanove / Lb. Pr. Sloven. Hudrometeorol. Ústavu. – 1985. – №26. – 305-341.
18. *Ungeheuer. H.* Erfahrungen mit dem Sättigungs grad. / Meteorol. Rundschau. – 1957. – 7. – №1 – 2. – 16-19.
19. *Wierzbicki Z.* O nedosycie wilgotnosci powietrza w Polsce. / Ann. Univ. M. Curie – Sclodowska. – 1959(1960). – B14. – 1-45.

*Український науково-дослідний  
гідрометеорологічний інститут, Київ  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка*

**А.В. Сидоренко, В.И. Затула**

**Особенности пространственно-временной структуры полей дефицита насыщения и их связь с Североатлантическим колебанием в условиях современного климата Украины.**

*Проанализировано тренды месячных рядов среднего дефицита насыщения, оценено зависимости величины дефицита насыщения в зависимости от высоты над уровнем моря, широты и долготы местности; охарактеризовано периодические колебания месячных величин среднего дефицита насыщения, проведено оценку влияния Североатлантического колебания на распределение полей дефицита насыщения.*

**Ключевые слова:** дефицит насыщения, современные изменения климата, особенности полей дефицита насыщения, пространственные градиенты, аналогичность полей, Северо-Атлантическое колебание.

**A.V. Sydorenko, V.I. Zatula**

**Features of spatial and temporal structure of saturation deficit fields and their relationship with the North-Atlantic oscillation in the conditions of Ukrainian modern climate.**

*Trends of mean monthly rows saturation deficit were analyzed, depending the value of saturation deficit of altitude, latitude and longitude were estimated, periodic fluctuations in monthly values of the average saturation deficit were characterized, evaluation of the impact of the North Atlantic oscillation on distribution of saturation deficit fields were held.*

**Keywords:** saturation deficit, climate change, features of saturation deficit fields, spatial gradients, similarity of fields, the North Atlantic oscillation.