

УДК 551.582

## ЗАСТОСУВАННЯ КЛІМАТОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТУМАНООУТВОРЕННЯ РАДІАЦІЙНИХ ТУМАНІВ

О. М. Грушевський, А.О. Яцишен

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [yatanatoli@gmail.com](mailto:yatanatoli@gmail.com)

Ефективність прогнозу радіаційних туманів визначається точністю прогнозу двох величин – температури туманоутворення і мінімальної температури повітря. Точність розрахунку першої істотно залежить від ступеня адаптованості способу її прогнозу до конкретних чинників, які впливають на утворення туманів – орфографія, місцеві циркуляції, сезони року, час доби, температуро-вологісна стратифікація у граничному шарі атмосфери тощо. Врахування кожного з них у конкретному пункті матиме свої особливості, а використання неадапованих способів прогнозу туману знижуватиме їх ефективність.

У статті пропонується підхід, який дає можливість проведення порівняльного аналізу прогностичного значення температури туманоутворення та її середнього значення, характерного для конкретного пункту, сезону та часу доби.

Для реалізації підходу у дослідженні одержана добово-річна повторюваність туманів на ст. Київ за 2012-2020 рр., на підставі якої, для кожного поєднання місяця і часу доби, визначалася середня температура туманоутворення за даними фактичних спостережень і, для порівняння, за методом Сандерса, у якому, в якості вихідних, використовуються дані радіозондування атмосфери. За результатами аналізу структури розподілу повторюваності туманів проведена апроксимація добово-річного розподілу температури туманоутворення поліноміальними функціями та гармонічним двовимірним осцилятором. За обраним критерієм ефективності, шляхом послідовного відбору, визначено, що найефективнішою є поліноміальна апроксимація даних про фактичну температуру туманоутворення протягом року. Одержання аналітичного виду функції розподілу імовірності добово-річних значень температури туманоутворення дозволяє побудувати графіки її добової змінюваності для будь-якого місяця року. Цей результат дає можливість контролю викидів прогностичних значень температури туманоутворення для конкретного пункту, сезону та часу доби, що дозволить підвищити ефективність наявних способів її прогнозу.

**Ключові слова:** прогноз туману; температура туманоутворення; добово-річна повторюваність; апроксимація розподілу; поліном.

### 1. ВСТУП

Визначення температури туманоутворення може відбуватися різними шляхами, але найпоширенішими наразі способами є її визначення шляхом використання встановлених залежностей між певними предикторами, або на застосуванні способів, які базуються на врахуванні структури вертикального розподілу метеовеличин у граничному шарі атмосфери. Проте, при реалізації цих підходів, виникає низка ускладнень. До головних серед них можна віднести нівелювання адаптованості методу до умов конкретного пункту, суттєву чутливість результатів розрахунку до структури вертикальних профілів метеовеличин у момент радіозондування, якість даних радіозондування, а також вплив додаткових чинників, які

порушують локальність процесу.

Аналізуючи сучасні підходи до покращення справджуваності прогнозів туману, можна зупинитися на двох. Перший, досить кошковий, пов'язаний з впровадженням у практику оперативних метеопідрозділів даних, що надходять з метеодрону. Такий експеримент проводиться у аеропорту Цюриха і дозволяє, по-перше, одержувати в районі аеродрому метеорологічні дані з будь-яким просторово-часовим розділенням і, по-друге, виявляти особливості просторово-часової структури зон туманів з точністю, яка є недоступною для результатів супутникового моніторингу і даних чисельного моделювання [1].

Другий підхід, який є досить поширеною практикою у роботі оперативних

метеопідрозділів країн ЄС та США, полягає у врахуванні впливу місцевих фізико-географічних умов, що зумовлює необхідність налаштування блоків програмного забезпечення для прогнозу туманів під локальні умови пункту прогнозу. Перш за все, мається на увазі, що усі предиктори, що є значимими для прогнозу туману, мають враховуватися з певними – найоптимальнішими для пункту прогнозу – коефіцієнтами. Таким чином, той чи інший метод (індекс) проходить адаптацію до конкретного пункту [2].

Для кожного з таких індексів встановлюються межі градації, яка сигналізує про помірну імовірність утворення туману. Відповідно усі значення, які розташовуються ліворуч (праворуч) від зазначених меж градації, свідчать про низьку (високу) імовірність утворення туману.

Загальна методика прогнозування радіаційних туманів є достатньо опрацьованою, проте ефективність окремо взятих методів досить сильно залежить, як зазначалося, від їх адаптованості до місцевих умов [3, 4-6]. Це, насамперед, пояснюється досить широким спектром чинників, які впливають на їх утворення – орографія, місцеві циркуляції, сезон року, час доби, температурно-вологісна стратифікація у граничному шарі атмосфери, зовнішні впливи тощо. Врахування кожного з них у конкретному пункті матиме свої особливості, а використання неадапованих способів прогнозу туману знижуватиме їх ефективність.

Загалом, вся схема прогнозу радіаційного туману зводиться до порівняння двох величин – температури туманоутворення і мінімальної температури [3]. При цьому, для прогнозу температури туманоутворення, зазвичай, у якості вихідних даних використовуються значення метеовеличин у момент заходу Сонця, відомості про вертикальну структуру метеовеличин у ГША за даними радіозондування у 00 СГЧ або ж дані чисельного моделювання [6, 7, 8]. Подальші розрахунки базуються на використанні встановлених графічних (регресійних) залежностей між цими предикторами, і власне, температурою туманоутворення. Проте, при реалізації такого підходу, внаслідок дії низки чинників, виникає імовірність одержання таких її прогностичних значень, які є своєрідними «викидами» порівняно з реальною температурою туманоутворення [6,7].

Саме тут виникає необхідність порівняння прогностичного значення температури туманоутворення з її кліматологічними показниками, які є характерними для конкретного пункту, сезону року і часу доби. Це дозволило б здійснювати своєрідну фільтрацію прогностичних значень і мінімізувати суттєві помилки розрахунків.

Метою дослідження є розробка підходу для визначення температури туманоутворення радіаційних туманів через кліматологічні показники її добово-річного розподілу.

## 2. ВИХІДНІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Адаповані критеріальні значення індексів (параметрів) туману також будуть залежати від таких факторів, як місяць року, час доби, напрямок вітру. Ці фактори утворюють другу групу – так званих спеціальних предикторів – ваговий внесок яких також має бути врахованим при розробці прогнозу туману. Очевидно, що для їх визначення необхідно одержати кліматологічні характеристики туманів для окремо взятого пункту. При цьому вони мають наочно відображати хід повторюваності туманів залежно як від сезону року, так і від часу доби. Враховуючи кількісні показники кліматології туманів, можна адаптувати будь-який набір предикторів, інформативність яких, стосовно його прогнозу, буде доведена.

Корегування критеріальних значень основного предиктора(ів) здійснюється шляхом надання кожному спеціальному предиктора вагового коефіцієнту, який визначається з кліматології туманів для конкретного пункту. При цьому збільшення повторюваності туманів, при даному значенні спеціального предиктора, має наближати значення основного предиктора до критеріального значення.

У якості вихідних даних для проведення дослідження використовувалися дані спостережень за фактичною погодою на станції Київ (Жуляни) за період з 2012 по 2020 роки. Протягом цього періоду відбиралися випадки з радіаційним туманом, для яких була розрахована їх повторюваність по місяцям та часу доби, а також фіксувалися температури туманоутворення (температура повітря біля поверхні землі у строк найближчий до моменту утворення туману).

За наявності туману бралися усі години, протягом яких він відзначався, а за значення температури туманоутворення – її значення у

строк, найближчий до моменту утворення туману. Паралельно з визначенням фактичної температури туманоутворення, визначалися її значення за методом Сандерса. Для цього використовувалися дані радіозондування на ст. Київ за 00 СГЧ поточної доби протягом того ж періоду.

### 3. ОТРИМАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Використовуючи кліматологію туманів на ст. Київ, побудований добово-річний розподіл температури туманоутворення на підставі розрахунку її середніх значень для кожного поєднання місяцю року та часу доби. Паралельно з цим, аналогічний розподіл одержаний і для температури туманоутворення, розрахованої за методом Сандерса (рис. 1).

Аналіз добово-річного розподілу повторюваності туманів для станції Київ (рис. 1) свідчить, що переважна більшість випадків туману спостерігається протягом перехідних сезонів року з вираженим максимумом у вересні-грудні в період з 02 до 06 години місцевого часу.

Підбір апроксимуючої функції, яка виражатиме залежність між добово-річним розподілом і значеннями самої температури туманоутворення, здійснювався з використанням програмного забезпечення Origin. Важливою

перевагою такого підходу є можливість обмеження при подальших розрахунках деяких параметрів, що входять у апроксимуючу функцію, рядами відносно невеликої довжини порівняно, наприклад, з довжиною рядів необхідної для одержання стійких значень повторюваності цієї ж величини, що рідко спостерігається.

Використовуючи дані добово-річного розподілу температури туманоутворення і враховуючи циклічність повторюваності туманів у площині  $x, y$ , спочатку апроксимуємо дані простим гармонічним двовимірним осцилятором виду

$$z = z_0 + A \cos\left(\frac{x}{\omega_1}\right) + B \sin\left(\frac{x}{\omega_1}\right) + C \cos\left(\frac{y}{\omega_2}\right) + D \sin\left(\frac{y}{\omega_2}\right) \quad (1)$$

де  $A, B, C, D$  – коефіцієнти апроксимації;  $x, y$  – час доби та місяць року відповідно;  $\omega_1, \omega_2$  – циклічна частота.

Дані (рис.2) були оформлені у тривимірному домені  $(x; y; z)$ , де  $x$  – час доби;  $y$  – місяць року,  $z$  – температура туманоутворення.

Параметри апроксимації повторюваності добово-річного розподілу туманів, наведені у (табл. 1).

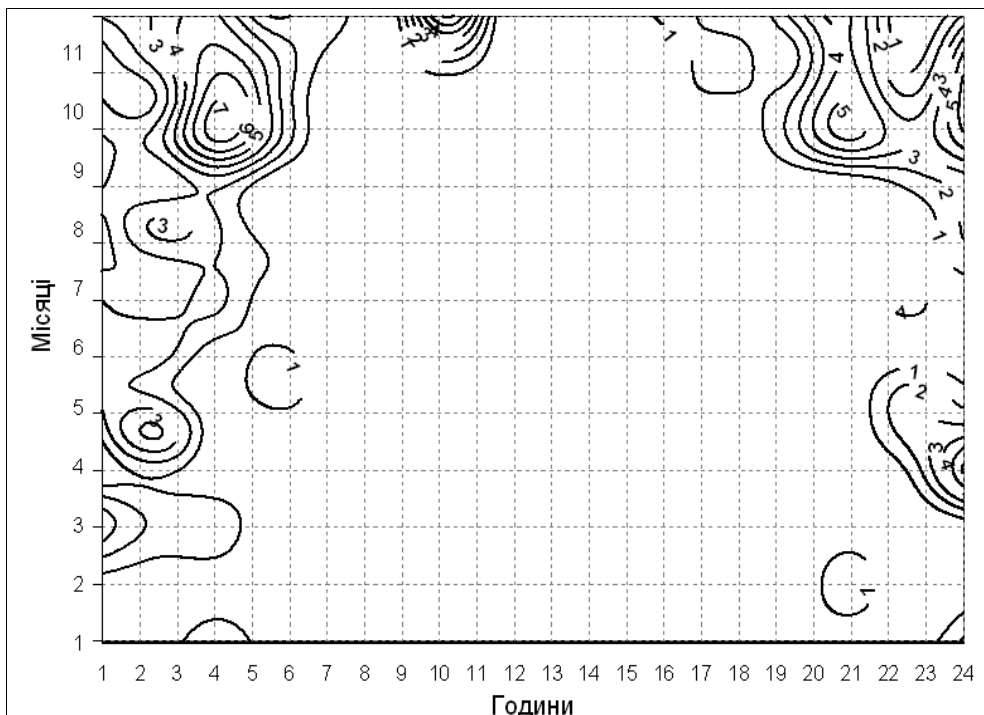
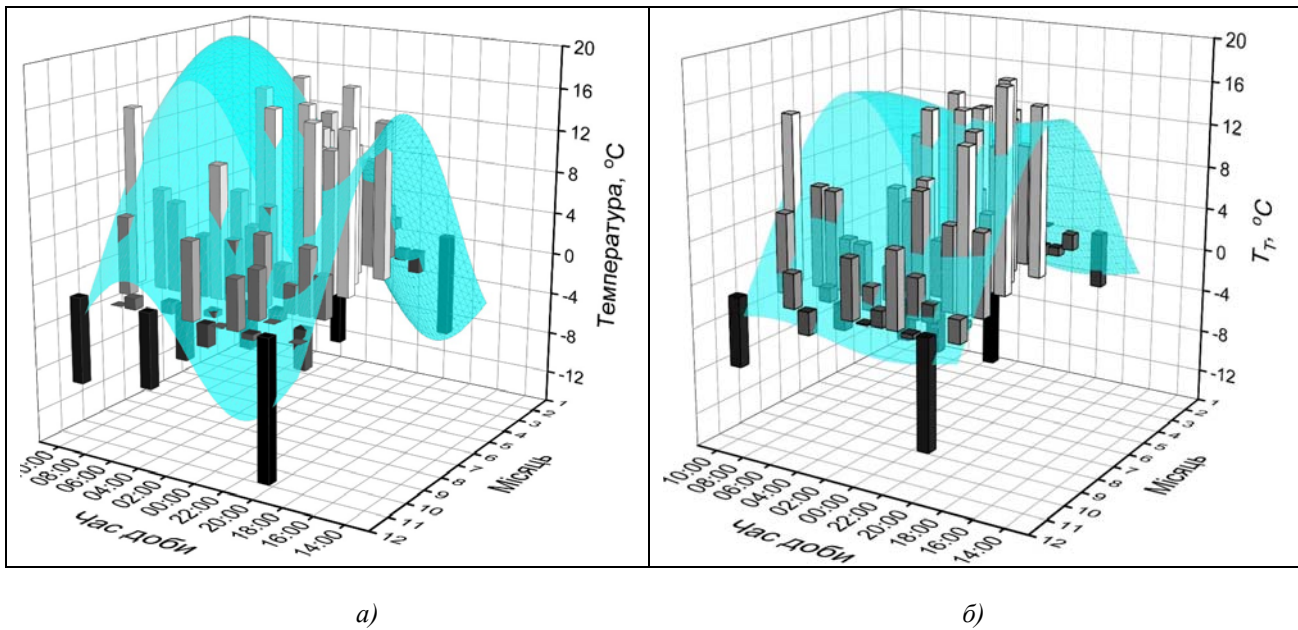


Рис. 1 – Добово-річна повторюваність туманів на ст. Київ в період з 2012 по 2020 р.

Fig. 1 - Daily-annual recurrence of fogs at Kyiv station in the period in the period from 2012 to 2020



**Рис. 2** – Апроксимація добово-річного ходу туманів на ст. Київ з використанням функції (1) для фактичної температури туманоутворення (а) та температури туманоутворення, розрахованої за методом Сандерса (б)

**Fig. 2** - Approximation of the diurnal-annual course of fogs in Kyiv station using function (1) for the actual fogging temperature (a) and the fogging temperature calculated by the Sanders method (b)

**Таблиця 1** – Параметри апроксимації для виразу (1) («±» похибка апроксимації)  
**Table 1** - Approximation parameters for expression (1) ("±" approximation error)

	для фактичної $T_T$	для $T_T$ , за методом Сандерса
$z_0$	$3,45 \pm 0,51$	$4,00 \pm 0,43$
$A$	$-12,04 \pm 1,44$	$-9,97 \pm 1,22$
$B$	$3,99 \pm 1,14$	$3,50 \pm 0,97$
$C$	$-5,11 \pm 1,08$	$-0,73 \pm 0,15$
$D$	$0,14 \pm 0,40$	$0,25 \pm 0,38$
$\omega_1$	$2,44 \pm 0,71$	$2,40 \pm 0,72$
$\omega_2$	$2,44 \pm 0,36$	$2,39 \pm 2,19$
$R^2$	0,54	0,59

Таким чином, аналітичний вираз функції розподілу для добово-річної повторюваності туманів за даними про фактичну температуру туманоутворення набуде виду:

$$T_T = 3,45 - 12,04 \cos\left(\frac{t}{2,44}\right) + 3,99 \sin\left(\frac{t}{2,44}\right) - 5,11 \cos\left(\frac{M}{2,44}\right) + 0,14 \sin\left(\frac{M}{2,44}\right) \quad (2)$$

а за даними про температуру туманоутворення, визначену за методом Сандерса

$$T_T = 4,00 - 9,97 \cos\left(\frac{t}{2,40}\right) + 3,5 \sin\left(\frac{t}{2,40}\right) - 0,72 \cos\left(\frac{M}{2,39}\right) + 0,25 \sin\left(\frac{M}{2,39}\right) \quad (3)$$

де  $t$  – час утворення туману;  
 $M$  – номер місяця, для якого розробляється прогноз.

Далі проведемо апроксимацію поліномами, починаючи з 2-ої степені, і зупинимося на тому з них, який засвідчить найвищий коефіцієнт детермінації  $R^2$ . Візуалізація апроксимації даних добово-річного розподілу температури

туманоутворення двомірним поліномом 5-ої степені виду.

$$z = z_0 + \sum_{i=1}^5 (A_i x^i + B_i y^i), \quad (4)$$

представлена на (рис. 3), з параметрами апроксимації, наведеними у (табл. 2). Вираз (4), з урахуванням даних (табл. 2), для даних про фактичну температуру туманоутворення набуде виду

$$T_T = -164,8 - 27,2t + 95,9M + 12,2t^2 - 18,87M^2 - 1,9t + 1,7M^3 + 0,1t^4 - 0,1M^4 - 0,002t^5 + 0,001M^5, \quad (5)$$

а для значень температури туманоутворення, розрахованої за методом Сандерса, наступного виду

$$T_T = -158,5 - 34,2t + 94,2M + 16,1t^2 - 18,4M^2 - 2,8t^3 + 1,7 \cdot M^3 + 0,2t^4 - 0,01M^4 - 0,01t^5 + 0,001M^5. \quad (6)$$

Порівняння коефіцієнтів детермінації представлених функцій свідчить, що найефективнішою є апроксимація добово-річного розподілу двовимірним поліномом 5-ої степені для фактичної температури туманоутворення ( $R^2 = 0,74$ ).

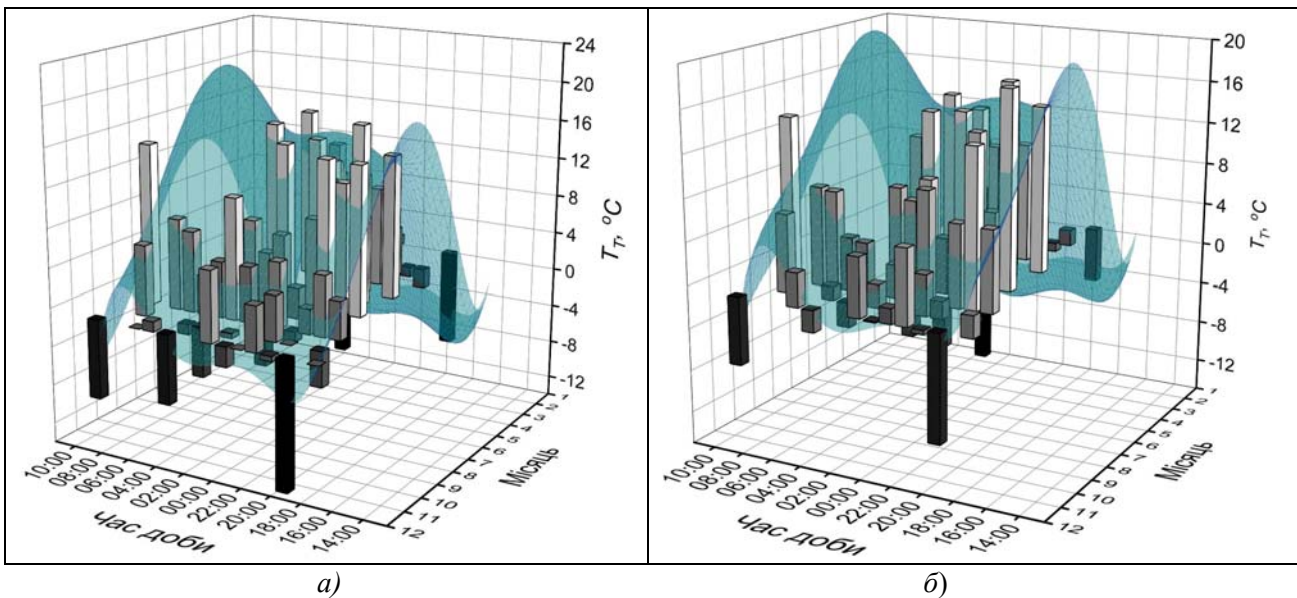


Рис. 3 – Те ж, що й на рис. 3, але з використанням поліноміальної функції (4)  
 Fig. 3 - The same as in Fig. 3, but using the polynomial function (4)

Таблиця 2 – Параметри апроксимації для виразу (4) («±» похибка апроксимації)  
 Table 2 - Approximation parameters for expression (4) ("±" approximation error)

	Для фактичної $T_T$	Для $T_T$ , за методом Сандерса
$z_0$	$-164,79 \pm 81,96$	$-158,50 \pm 89,49$
$A_1$	$-27,23 \pm 14,17$	$-34,21 \pm 14,73$
$A_2$	$12,23 \pm 5,85$	$16,09 \pm 6,09$
$A_3$	$-1,89 \pm 1,05$	$-2,75 \pm 1,09$
$A_4$	$0,12 \pm 0,08$	$0,20 \pm 0,09$
$A_5$	$-0,002 \pm 0,003$	$-0,01 \pm 0,003$
$B_1$	$95,87 \pm 43,63$	$94,21 \pm 47,48$
$B_2$	$-18,87 \pm 8,67$	$-18,36 \pm 9,38$
$B_3$	$1,74 \pm 0,81$	$1,67 \pm 0,87$
$B_4$	$-0,08 \pm 0,04$	$-0,07 \pm 0,04$
$B_5$	$0,001 \pm 0,0006$	$0,001 \pm 0,0007$
$R^2$	0,74	0,69

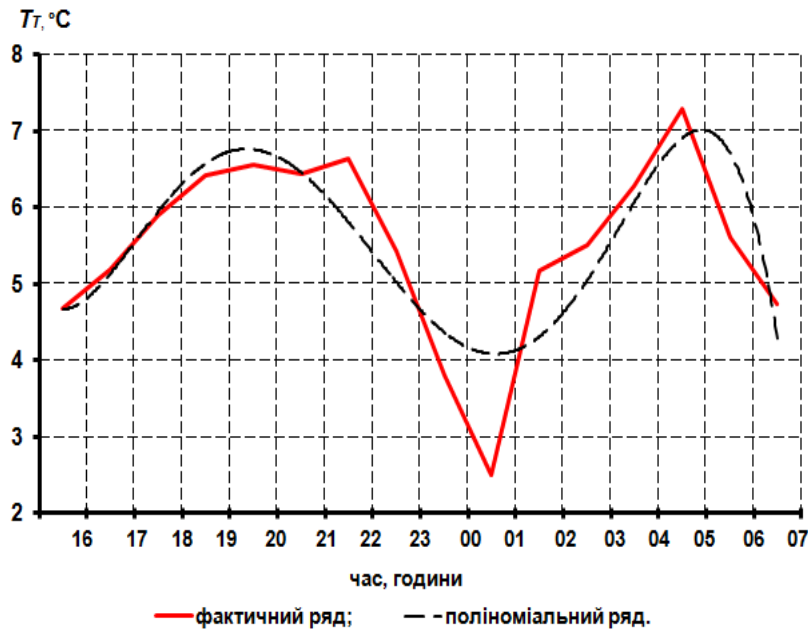


Рис. 4 – Адаптований графік добового ходу температури туманоутворення у жовтні на ст. Київ  
 Fig. 4 - Adapted schedule of daily fog temperature in October station Kyiv

Отже, за наявності функції розподілу добово-річної повторюваності температури туманоутворення, можливо визначити її «середній» добовий хід для будь-якого місяця року.

Наведений у якості прикладу графік на (рис. 4) можна вважати деяким «кліматологічним» для станції Київ розподілом температури туманоутворення, який доцільно використовувати при порівнянні прогностичної температури туманоутворення з мінімальною температурою.

Для виконання процедури згладжування одержаних розподілів застосуємо поліноміальну апроксимацію, результати якої також наведені (на рис. 4).

Таким чином, доцільно будувати подібні графіки для кожного місяця на конкретній станції. Це дозволить при визначенні температури туманоутворення уникнути «викидів» у її значеннях, які можуть бути спричинені різними факторами, шляхом порівняння прогностичного значення з кліматологічним.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Добово-річна повторюваність туманів на станції Київ характеризується можливістю їх утворення майже протягом усього року у нічні та ранкові години, період з 06 до 19 годин за досліджуваний період років тумани на станції

Київ не фіксувалися;

2. Проведена на підставі розрахунку середніх фактичних температур туманоутворення та середніх температур туманоутворення за методом Сандерса для різних поєднань місяця та часу доби для досліджуваного періоду апроксимація їх розподілу є найефективнішою для фактичних температур туманоутворення з використанням поліному 5-ої степені.

3. Аналітичний вираз теоретичної функції розподілу «кліматичної» температури туманоутворення дозволяє одержати графік її добового ходу для будь-якого місяця року.

4. Визначені з використанням теоретичної функції розподілу температури туманоутворення значення можуть використовуватися у якості додаткового критерію при визначенні співвідношення між мінімальною температурою і температурою туманоутворення при прогнозі туману.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Meteomatics Whitepaper Meteodrones. URL: [https://www.meteomatics.com/files/Verification-Documents / Meteomatics Whitepaper Meteodrones](https://www.meteomatics.com/files/Verification-Documents/Meteomatics%20Whitepaper%20Meteodrones) 2020. Pp. 1-18..
2. Environmental Research Services LLC. The Complete Rawinsonde Observation Program: User Guide and Technical manual. 2016, ver. 6.6 . Pp. 88-95.
3. Кошеленко И. В. Туманы. Труды Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. Москва: Гидрометеиздат, 1977. Вып. 155. 157 с.

4. Craddock J. M., Prichard D. L., Forecasting the formation of radiation fog – a preliminary approach. *Met. Res. Pap.* 1951. No. 624. Pp. 1-28.
5. Forecasting radiation fog at climatologically contrasting sites: evaluation of statistical methods and WRF / Román-Cascón C. et al. 2014. Vol. 142. Issue 695 January, part B. Pp. 1048 – 1063.
6. Brown R., Roach W.T. The physics of radiation fog II-a numerical study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 1976. Vol. 102. Pp. 351- 354.
7. Swagata Payra, Manju Mohan Multirule. Based Diagnostic Approach for the Fog Predictions Using WRF Modelling Tool. *Advances in Meteorology.* 2014 .Vol. 2014.
8. Saunders W.E. A method of forecasting the temperature of fog formation. *Meteorological Society.* 1950. Pp. 2403-2413.
3. Koshelenko, I.V. (1977). *Tumany. Trudy Ukrainskogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta [Fogs. Proceedings of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute].* Moscow: Gidrometeoizdat, 155. (in Russ.)
4. Craddock, J.M. & Prichard, D.L. (1951). Forecasting the formation of radiation fog – a preliminary approach. *Met. Res. Pap.*, 624, pp. 1-28.
5. Román-Cascón C. et al. (2014) *Forecasting radiation fog at climatologically contrasting sites: evaluation of statistical methods and WRF*, Vol. 142, Issue 695 January, part B, pp. 1048 – 1063.
6. Brown, R. & Roach, W.T. (1976). The physics of radiation fog II-a numerical study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 102, pp. 351- 354.
7. Swagata, Payra & Manju, Mohan Multirule. Based Diagnostic Approach for the Fog Predictions Using WRF Modelling Tool (2014). *Advances in Meteorology*, vol. 2014.
8. Saunders, W.E. (1950). A method of forecasting the temperature of fog formation. *Meteorological Society*, pp. 2403-2413.

## REFERENCES

1. *Meteomatics Whitepaper Meteodrones* (2020). Available at: [https://www.meteomatics.com/files/Verification-Documents / Meteomatics Whitepaper Meteodrones](https://www.meteomatics.com/files/Verification-Documents/Meteomatics%20Whitepaper%20Meteodrones), pp. 1-18.
2. Environmental Research Services LLC (2016). *The Complete Rawinsonde Observation Program: User Guide and Technical manual*, ver. 6.6 , pp. 88-95.

## APPLICATION OF CLIMATOLOGICAL APPROACH TO DETERMINE THE TEMPERATURE OF RADIATION FOGS FORMATION

O. M. Hrushevskiy, A. O. Yatsyshen

*Odessa State Environmental University, 15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, yatanatoli@gmail.com*

The effectiveness of a radiation fog forecast is determined by the accuracy of a forecast for two values – temperature of fog formation and minimum air temperature. The accuracy of the first measurement significantly depends on a degree of adaptability of a forecast method to specific factors affecting the formation of fogs – orthography, local circulations, seasons, time of day, temperature-humidity stratification in the boundary layer of the atmosphere, etc. Taking into account each of them in a specific point will dictate its characteristics, whereas use of non-adapted fog forecasting methods will reduce their effectiveness.

The article suggests an approach that makes it possible to carry out a comparative analysis of the prognostic value of the fog formation temperature and its average value pertaining to a specific point, season and time of day.

In order to implement the studied approach the research considered a daily-annual repeatability of fogs at Kyiv station over 2012-2020. Based on this an average temperature of fog formation for each combination of month and time of day was determined according to actual observation data and, for the purpose of comparison, according to the Sanders method that uses data from radio sounding of the atmosphere as its baseline. The results of the analysis of the structure of the fog repeatability distribution allowed approximation of the daily-annual distribution of fog formation temperature via polynomial functions and a harmonic two-dimensional oscillator. Based on the selected efficiency criterion it was determined, via sequential selection, that the polynomial approximation of the data indicating the actual temperature of fog formation during the year is the most effective method. Obtaining an analytical form of the probability distribution function of daily and annual values of the fog formation temperature allows us to plot graphs of its daily variability for any month of the year. Such result makes it possible to control emissions of forecast values of fog formation temperature for a specific point, season and time of day, which will increase the effectiveness of the existing ways of making the forecasts in question.

**Keywords:** fog forecast; fog formation temperature; daily-annual repeatability; distribution approximation; polynomial.

Подання до редакції : 13. 06. 2022  
Надходження остаточної версії : 15. 12. 2022  
Публікація статті : 27. 12. 2022