



No 2(6) | 2024

ISSN (print) 2786-9415

ISSN (online) 2786-9423

МЕТЕОРОЛОГІЯ
ГІДРОЛОГІЯ
МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ

METEOROLOGY
HYDROLOGY
ENVIRONMENTAL MONITORING

МЕТЕОРОЛОГІЯ. ГІДРОЛОГІЯ. МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ

№ 2 (6) • 2024

METEOROLOGY. HYDROLOGY. ENVIRONMENTAL MONITORING

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

Volodymyr Osadchyi, *D.Sci. in Geography,
Academician of the NAS of Ukraine*

Deputy Editors-in-Chief

Yurii Nabyvanets, *Ph.D.*

Oleksii Shevchenko, *D.Sci. in Geology*

Members of Editorial Board

Oleg Voitsekhovych, *Ph.D.*

Liudmyla Gorbachova, *D.Sci. in Geography*

Vasyl Grebin', *D.Sci. in Geography*

Svitlana Krakovska, *Ph.D.*

Peter Linnik, *D.Sci. in Chemistry*

Vazira Martazinova, *D.Sci. in Phys.&Math.*

Valeriya Ovcharuk, *D.Sci. in Geography*

Natalia Osadcha, *D.Sci. in Geography*

Valentyn Protsak, *Ph.D.*

Mykhailo Savenets, *Ph.D.*

Viktor Samoilenko, *D.Sci. in Geography*

Oleg Skrynyk, *Ph.D.*

Sergiy Snizhko, *D.Sci. in Geography*

Valentyn Khilchevskiy, *D.Sci. in Geography*

Valeriy Khokhlov, *D.Sci. in Geography*

Olga Shevchenko, *D.Sci. in Geography*

Vitalii Shpyg, *Ph.D.*

Tatiana Solovey, *D.Sci. in Geography
Research Institute "Polish Geological Institute",
Warsaw, Poland*

Petäjä Tuukka, *Ph.D.*

*Institute for Atmospheric and Earth System
Research (INAR), University of Helsinki, Finland*

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор

В.І. Осадчий, *д.геогр.н., професор,
академік НАН України*

Заступники головного редактора

Ю.Б. Набиванець, *к.геогр.н.*

О.Л. Шевченко, *д.г.н.*

Члени редколегії

О.В. Войцехович, *к.геогр.н.*

Л.О. Горбачова, *д.геогр.н., професор*

В.В. Гребінь, *д.геогр.н., професор*

С.В. Краковська, *к.ф.-м.н.*

П.М. Линник, *д.х.н., професор*

В.Ф. Мартазінова, *д.ф.-м.н., професор*

В.А. Овчарук, *д.геогр.н., професор*

Н.М. Осадча, *д.геогр.н., професор*

В.П. Процак, *к.т.н.*

М.В. Савенець, *к.геогр.н.*

В.М. Самойленко, *д.геогр.н., професор*

О.Я. Скриник, *к.ф.-м.н.*

С.І. Сніжко, *д.геогр.н., професор*

В.К. Хільчевський, *д.геогр.н., професор*

В.М. Хохлов, *д.геогр.н., професор*

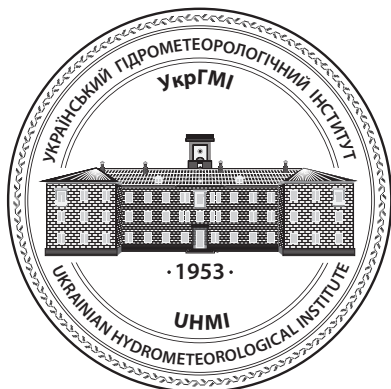
О.Г. Шевченко, *д.геогр.н.*

В. М. Шпиг, *к.геогр.н.*

Т.В. Соловей, *д. геогр. н., професор
НДІ "Польський Геологічний Інститут",
Варшава, Польща*

П. Туукка, *Ph.D., професор*

*Інститут системних досліджень атмосфери
і Землі, Університет Гельсінкі, Фінляндія*



МЕТЕОРОЛОГІЯ • ГІДРОЛОГІЯ • МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ

Київ. 2024. № 2 (6). 100 с.

Засновник та видавець

УКРАЇНСЬКИЙ
ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ДСНС УКРАЇНИ ТА НАН УКРАЇНИ

Журнал засновано
25 листопада 2021 року.
Виходить 2 рази на рік.

Внесено до переліку фахових видань
України (категорія "Б") за спеціальністю
Е4 (103) Науки про Землю
згідно наказу МОН України
№ 1721 від 10.12.24.

Адреса редакції:

Україна, проспект Науки, 37, Київ, 03028
e-mail: journal@uhmi.org.ua
тел. +38 044 525 1250

Відповідальний редактор:

Олексій Шевченко

Дизайн обкладинки:

Катерина Сурай

Editorial office address

37, Prospect Nauky, Kyiv, 03028, Ukraine
e-mail: journal@uhmi.org.ua
phone: +38 044 525 1250

Responsible editor:

Oleksii Shevchenko

Cover design:

Kateryna Surai

Підписано до друку 17.12.2024 р. Формат 60×84/8. Друк офсетний. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 11,16. Наклад 100 прим. Зам. № УГІ-02-24.

Оригінал-макет та друк ТОВ "ДІА": 03022, Київ-22, вул. Васильківська, 45.

Цілковите або часткове розмноження в будь-який спосіб матеріалів,
опублікованих у цьому виданні, допускається лише з письмового дозволу видавця.

ЗМІСТ

CONTENTS

| | | | |
|---|----|--|--|
| УПРАВЛІННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ | | MANAGEMENT OF WATER RESOURCES | |
| Solovey T., Śliwińska-Bronowicz J., Janica R., Brzezińska A. | 4 | Соловей Т., Слівинська-Бронович Ю., Яніца Р., Бжезінська А. | |
| Terrestrial water storage changes in the Bug river transboundary catchment observed by GRACE and water balance analysis | | Зміни водних ресурсів транскордонного басейну річки Західний Буг, виявлені на підставі супутникових спостережень GRACE і водно-балансових розрахунків | |
| ФІЗИКА І ХІМІЯ АТМОСФЕРИ | | PHYSICS AND CHEMISTRY OF ATMOSPHERE | |
| Савенець М.В., Надточій Л.М., Козленко Т.В., Комісар К.В., Уманець А.П., Жемера Н.С. | 17 | Savenets M.V., Nadtochii L.M., Kozlenko T.V., Komisar K.V., Umanets A.P., Zhemera N.S. | |
| Щодо неузгодженості даних різних джерел інформації про викиди та приземний вміст забруднюючих речовин в атмосферному повітрі над територією України | | Regarding the data inconsistency from different data sources on emissions and ground-level pollutants' concentrations in the atmospheric air over Ukraine | |
| КЛІМАТОЛОГІЯ | | CLIMATOLOGY | |
| Краковська С.В., Шпиталь Т.М., Чигарева А.Ю., Савчук С.В., Криштон Л.Ю. | 33 | Krakovska S.V., Shpytal T.M., Chyhareva A.Yu., Savchuk S.V., Kryshtop L.Yu. | |
| Кліматичні характеристики термічних періодів в Україні до кінця XXI ст. Частина II: Вегетаційний період | | Climate characteristics of thermal periods in Ukraine until the end of the 21 st century. Part II: Growing season | |
| ГІДРОЛОГІЯ СУХОДОЛУ | | HYDROLOGY | |
| Христюк Б.Ф. | 50 | Khrystiuk B. | |
| Автоматизація процесу довгострокового прогнозування строків руйнування льодоставу та очищення від льоду на Дніпровських водосховищах | | Process automation of the long-term forecasting of ice break-up and ice disappearance dates at the Dnipro reservoirs | |
| ГІДРОХІМІЯ, РАДІОЕКОЛОГІЯ | | HYDROCHEMISTRY, RADIOECOLOGY | |
| Жежеря В.А., Жежеря Т.П., Линник П.М., Осипенко В.П. | 59 | Zhezherya V.A., Zhezherya T.P., Linnik P.M., Osipenko V.P. | |
| Особливості гідрохімічного режиму антропогенно змінених поверхневих водних об'єктів | | Features of the hydrochemical regime of anthropogenically altered surface water bodies | |
| МОРСЬКА ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЯ ТА ОКЕАНОГРАФІЯ | | MARINE HYDROMETEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY | |
| Ільїн Ю.П. | 72 | Ilyin Yu.P. | |
| Прояви взаємодії річкових і морських вод у статистичній структурі солоності за даними спостережень на берегових станціях України | | Manifestations of the interaction of riverine and marine waters in the statistical structure of salinity by the observations data at coastal stations of Ukraine | |
| ПРИКЛАДНА МЕТЕОРОЛОГІЯ | | APPLIED METEOROLOGY | |
| Орещенко А.В. | 80 | Oreshchenko A.V. | |
| Методи оптимізації до створення веб-базованого атласу "Клімат і водні ресурси України" | | Optimization methods for the creation of web-based atlas "Climate and water resources of Ukraine" | |
| ПАМ'ЯТНІ ТА ЮВІЛЕЙНІ ДАТИ | | MEMORABLE AND ANNIVERSARY DATES | |
| Сусідку Михайлу Микитовичу — 100 | 95 | Mykhailo Susudko — 100 | |
| До 80-річчя Євгена-Зенона Стахів | 97 | To the 80 th Anniversary of Yevhen-Zenon Stakhiv | |
| ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ | 99 | RULES FOR AUTHORS | |

Tatiana Solovey¹

ORCID 0000-0001-8949-4075
Tatiana.solovey@pgi.gov.pl

Justyna Śliwińska-Bronowicz²

ORCID 0000-0001-7502-5243
jsliwinska@cbk.waw.pl

Rafał Janica¹

ORCID 0009-0001-7142-5570
rafal.janica@pgi.gov.pl

Agnieszka Brzezińska¹

ORCID 0009-0006-2007-9053
agnieszka.brzezinska@pgi.gov.pl

¹ Polish Geological Institute — National Research Institute, Rakowiecka 4, PL00975, Warsaw, Poland

² Space Research Centre of the Polish Academy of Sciences, Bartycka 18a, PL00716, Warsaw, Poland

УДК 502.51(282.03)

DOI: <https://doi.org/10.15407/Meteorology2024.06.004>

TERRESTRIAL WATER STORAGE CHANGES IN THE BUG RIVER TRANSBOUNDARY CATCHMENT OBSERVED BY GRACE AND WATER BALANCE ANALYSIS

Central and Southern Europe is undergoing a drying trend driven by increased evapotranspiration and rising air temperatures, even though precipitation levels remain stable. In the Bug River Basin, GRACE observations indicate that total water storage (TWS) declined at a rate of 8.8 ± 5.2 mm/year between 2012 and 2023. To validate this trend, we analysed spatial and temporal discrepancies between TWS-GRACE and water budget-based estimates (TWS-WB). Using ensemble data assimilation techniques, we integrated hydrometeorological data with TWS-GRACE. Regression models developed for TWS simulation were employed to adjust TWS-GRACE estimates. The results demonstrate that TWS fusion effectively mitigates uncertainties in TWS-GRACE caused by its low spatial and temporal resolution. Correlation analysis between TWS-fusion and TWS-GRACE identified errors in GRACE solutions and commonly used autoregressive methods for filling data gaps. Our findings show that model developed in this study significantly improved alignment between TWS-GRACE and TWS-WB, reducing RMSE from 34.7 to 14.9 mm/month. The proposed data fusion approach based on combining GRACE observations with precipitation, evapotranspiration, and runoff data, offers a viable alternative for extending TWS-GRACE time series beyond the GRACE observational period. Additionally, our research provides valuable insights for downscaling GRACE data and addressing challenges in spatial and temporal interpolation, which remain critical in water resource studies.

Key words: GRACE, terrestrial water storage, water budget, Bug River, fusing data.

INTRODUCTION

The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) and GRACE Follow-On (GRACE-FO) missions were the first to provide global-scale insights into cumulative changes in water storage across various components, including snow, ice, lakes, rivers, soil moisture, and underground aquifers. This achievement represented a significant breakthrough in monitoring the terrestrial water cycle (Tapley et al., 2019). The GRACE and GRACE-FO missions will be collectively referred to as “GRACE” hereafter. GRACE measurements of total water storage change (TWS) play a pivotal role in closing the water balance, which represents the equilibrium between precipitation and water losses due to evapotranspiration (ET), river runoff (R), and changes in terrestrial water storage (Δ TWS). Understanding changes in TWS is essential for assessing the impacts of climate change and is recognized as an Essential Climate Variable by the Global Climate Observing System (GCOS). At present, the GRACE missions are the only sources of direct TWS data. However, their coarse spatial resolution limits their applicability

for regional-scale water cycle monitoring (Vishwakarma et al., 2018). The spatial resolution of GRACE measurements is generally estimated to be approximately 300×300 km (Tapley et al. 2004). Consequently, many studies leveraging GRACE data focus on enhancing data resolution (Rowlands et al., 2005; Miro & Famiglietti, 2018; Sun et al., 2019; Vishwakarma et al., 2021; Zhong et al., 2021; Pascal et al., 2022; Yin et al., 2022) or improving measurement accuracy (Becker et al., 2011; Frappart et al., 2013; van Dijk et al., 2014; Long et al., 2015; Chen et al., 2022).

This study focuses on enhancing TWS estimates by integrating observational data of water balance components with TWS estimates derived from the GRACE mission. Using the balance approach, TWS is defined as Δ TWS = $P - ET - R$, assuming a perfectly closed water budget. Despite advancements in achieving high-resolution global monitoring of the terrestrial water cycle, significant challenges persist in producing physically consistent and accurate estimates of water balance components. These challenges stem from uncertainties in individual component estimates derived

from various satellite sensors and models, as well as limitations in spatial and temporal resolution (Sahoo et al., 2011). The main challenge in achieving a fully closed water balance lies in the fact that no single satellite sensor can capture all components of the water cycle simultaneously. Nonetheless, the use of *in-situ* measurements allows for the integration of individual component estimates into a unified and physically consistent representation of the water cycle balance.

Comparisons between TWS estimates derived from the water balance approach and GRACE data generally indicate a strong agreement. Studies conducted on the world's 10 largest river basins (Sahoo et al., 2011), China (Long et al., 2015), and Africa (Nanteza et al., 2016; Hassan & Jin, 2016) report coefficients of determination (R^2) in the range of 0.6–0.8.

Our study evaluates and compares the accuracy of TWS-GRACE estimates against water balance data for the transboundary Bug River Basin, located at the intersection of Poland, Ukraine, and Belarus, using statistical analysis. Regression models were developed to explore relationships between TWS and its predictors, enabling the identification of spatiotemporal mismatch patterns between TWS values estimated from the water balance (TWS-WB) and those observed by GRACE (TWS-GRACE).

The Bug River (772 km) is a significant transboundary waterway in Eastern Europe, with a catchment area of approximately 40,000 km² spanning Poland, Ukraine, and Belarus (Fig. 1). Its catchment features a complex structure due to its location within two distinct physical and geographical regions: the East Baltic-Belarusian Lowlands and the Ukrainian Uplands. In Poland, the Bug River catchment is recognized as one of the most impacted by water resource reductions attributed to global warming, with river runoff estimated to have decreased by around 20% compared to the 1951–1988 period (Urban et al., 2022; Kostrzewski & Abramowicz, 2023). Analyzing TWS changes using GRACE observations and water balance estimates provides valuable insights into GRACE signal perturbations in hydrologically complex basins. These findings can also contribute to enhancing integrated water resource management at the catchment level. So far, no studies on TWS changes have been conducted in the Bug River basin. The only point of reference is the TWS estimate for the Dnipro River basin for the period 2003–2016, where the rate of water resources decline was found to be -13 ± 1.56 mm/a (Zhang et al., 2024).

The **specific objectives** of this study were as follows: (1) assessing differences in TWS estimation using the water balance approach and GRACE data; (2) conducting a water cycle reanalysis for the period 2012–



Fig. 1. Location of the study area

2023 by merging satellite gravimetry, satellite-derived evapotranspiration (*ET*) product, and *in-situ* runoff (*R*) and precipitation (*P*) data. The novelty of our approach lies in the adaptation of global TWS-GRACE data to regional analyses using physical predictors — the main components of the water balance.

DATA USED AND METHODS

1. GRACE data. For TWS anomalies derived from GRACE measurements, we utilized the mascon solution provided by the Center for Space Research (CSR), specifically CSR RL06.3 (Save, 2020; Save et al., 2016). The mascon approach divides Earth's surface into predefined regions called "mascons" (mass concentrations). Each mascon aggregates gravity changes over its area, enhancing spatial resolution and reducing noise compared to traditional spherical harmonic (SH) methods. Unlike SH approaches, most mascon solutions calculate TWS anomalies directly from observed satellite accelerations and distance changes, bypassing the need for an indirect conversion between SH coefficients and TWS (Watkins et al., 2015). This makes mascon methods particularly effective for analyzing regional water storage variations. Mascons improve

spatial resolution by enabling more precise detection of mass changes over smaller areas, such as river basins or aquifers, compared to global SH methods. As a result, mascon-based solutions are increasingly used in regional studies over SH-based data (e.g., Jing et al., 2019; Ran et al., 2018; Scanlon et al., 2016; Velicogna et al., 2020). In CSR RL06.3 solution, TWS anomalies was resampled to a regular $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ longitude-latitude grid, enhancing the representation of coastlines and supporting applications in smaller regions. However, the native resolution of CSR RL06.3, determined by the mascon size, remains $1^\circ \times 1^\circ$ (Save et al., 2016). The data were accessed via the CSR website (https://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html, accessed 01.01.2024).

2. Evapotranspiration data. For ET, we use SSEBop (Simplified Surface Energy Balance) model data based Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) thermal imagery, updated every 10 days (Savoca et al. 2013, Senay 2018). The unique feature of the SSEBop model is that it uses a pre-defined, seasonally, and spatially dynamic surface psychrometer parameter to calculate ETf as the difference between observed land surface temperature (dry-bulb) and a cold/wet boundary condition (wet-bulb) using the principle of satellite psychrometry (Senay, 2018). The dataset is produced by estimating latent heat flux through surface energy balance principles. This robust model is instrumental in analyzing the spatiotemporal patterns of water use across land surfaces. The advantage of this product is its high resolution (1 km) and good quality in the study area, verified with *in-situ* data (Somorowska, 2021). The data were obtained from the website (<https://earlywarning.usgs.gov/fews/product/460>, accessed 01.01.2024). By aggregating the fields the original 1 km resolution was transformed into 1.0° resolution.

3. Precipitation data. For precipitation data, we utilized the E-OBS daily gridded meteorological dataset (Cornes et al., 2018). E-OBS provides a comprehensive collection of surface climate variables, including daily precipitation, temperature, sea level pressure, wind speed, relative humidity, and global radiation. These parameters are derived from *in-situ* measurements sourced from national archives and interpolated statistically to generate regular grids with resolutions of $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ or $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (Haylock et al., 2008; Klok & Klein Tank, 2008). In this study, the source 0.25° resolution precipitation data were adjusted to $1^\circ \times 1^\circ$ resolution by area averaging. This is achieved by aggregating fields from 0.25° to 1.0° resolution. The dataset spans Europe, covering the period from 1950 to the present, and is continuously updated to include new daily observations and an increasing number of contributing

stations. In this study, we employed the latest version, E-OBS 30.0e, released in September 2024, which is accessible at: https://surfobs.climate.copernicus.eu/dataaccess/access_eobs.php#datafiles, accessed 01.01.2024.

4. Runoff data. The hydrological data used in this study to estimate river discharge were sourced from *in-situ* measurement stations. Monthly river discharge data from 2012 to 2023 were utilized, with the daily discharge data for 30 gauging stations obtained from the Institute of Meteorology and Water Management in Poland and the Ukrainian Hydrometeorological Institute. The data were accessed through the website (<https://danepubliczne.imgw.pl/datastore>, accessed 01.01.2024). The river discharge values were then converted into runoff per square kilometer of the catchment area.

5. GRACE data processing. Due to the original mascon size ($1^\circ \times 1^\circ$) in the CSR RL06.3 solution, adjacent 0.25 -degree grids exhibited nearly identical TWS anomaly values, making analyses at such a fine grid resolution unreasonable. To reflect the temporal resolution of GRACE resulting from mascon size, we resampled the 0.25 -degree grids to 1 -degree grids using three-dimensional linear interpolation. A well-known limitation of GRACE data is the one-year gap between the end of the GRACE mission and the start of the GRACE-FO mission. Various methods have been proposed to address this gap, including statistical techniques, advanced approaches using machine learning, and the incorporation of supplementary data (e.g., Forootan et al., 2020; Gyawali et al., 2022). In this study, we used the autoregressive integrated moving average (ARIMA) model to predict the missing months, as it is particularly effective for series where the seasonal signal predominates (Box et al., 2016). Shorter data gaps (1 or 2 months) in the GRACE-based TWS series were filled using linear interpolation.

6. Fusing GRACE data into terrestrial water budget. The month-to-month TWS-WB change (Δ TWS-WB) is determined using the water balance equation:

$$dS/dt = P - R - ET, \quad (1)$$

where dS/dt is the monthly TWS change (mm/month); P is the monthly precipitation (mm/month); R is the streamflow (mm/month) and ET is the monthly evapotranspiration (mm/month). P and ET were obtained using satellite products integrated with model data, while R was based on *in-situ* measurements.

The month-to-month TWS-GRACE (Δ TWS-GRACE) change is computed from GRACE-based TWS anomalies (in mm) for a specific month (t):

$$dS/dt = (TWS_{t+1} - TWS_{t-1})/t. \quad (2)$$

The relationship between the hydrological flux variables and the TWS-GRACE grid scale was established using a multidimensional linear regression model, which links the predictor (Y) — the variable to be predicted — with the predictor (X) — obtained from the set of observations:

$$Y = XH, \quad (3)$$

where Y ($n \times g$) is a matrix with n rows (one for each month) and g columns (one for each grid cell in the Bug basin). The predictor matrix X ($n \times d$) has n rows (one for each month) and d columns containing P , ET , R and TWS-GRACE. H ($d \times g$) is the prediction matrix. Before performing this calculation, the data is standardized to prepare the predictor matrix X . Since global products are typically available in grid cell formats with varying spatial resolutions, the values for P , ET , and R were adjusted to align with the spatial resolution of TWS-GRACE ($1^\circ \times 1^\circ$ grid).

Dimension reduction is essential for multivariate regression analysis and is performed using Partial Least Squares Regression (Vishwakarma et al., 2021). The goal of this approach is to regress on the Principal Components (PCs) of measurements that have a

strong correlation with the target signal (Preisendorfer, 1988).

To assess the accuracy of the final product—combined TWS derived from TWS-GRACE and water balance components—standard statistical metrics were used, including the root mean square error (RMSE) and the Pearson correlation coefficient (CC).

RESULTS AND DISCUSSION

1. Comparison of TWS-GRACE and TWS-WB.

Figure 2 presents the TWS-GRACE and TWS-WB time series averaged over the Bug River Basin for the period 2012–2023, while Figure 3 illustrates the changes in the corresponding TWS series averaged for each year. Over the analysed period the series show a declining trend in annual values (Fig. 3), with the long-term average TWS for the Bug River Basin being -1.78 mm/year for TWS-GRACE and -1.58 mm/year for TWS-WB, both with standard deviations of 47.2 and 47.0 mm/year, respectively. The highest annual TWS averages (over 60 mm/year) occurred in 2013 and 2017, while the lowest averages (below -50 mm/year) were recorded in 2019 and 2020.

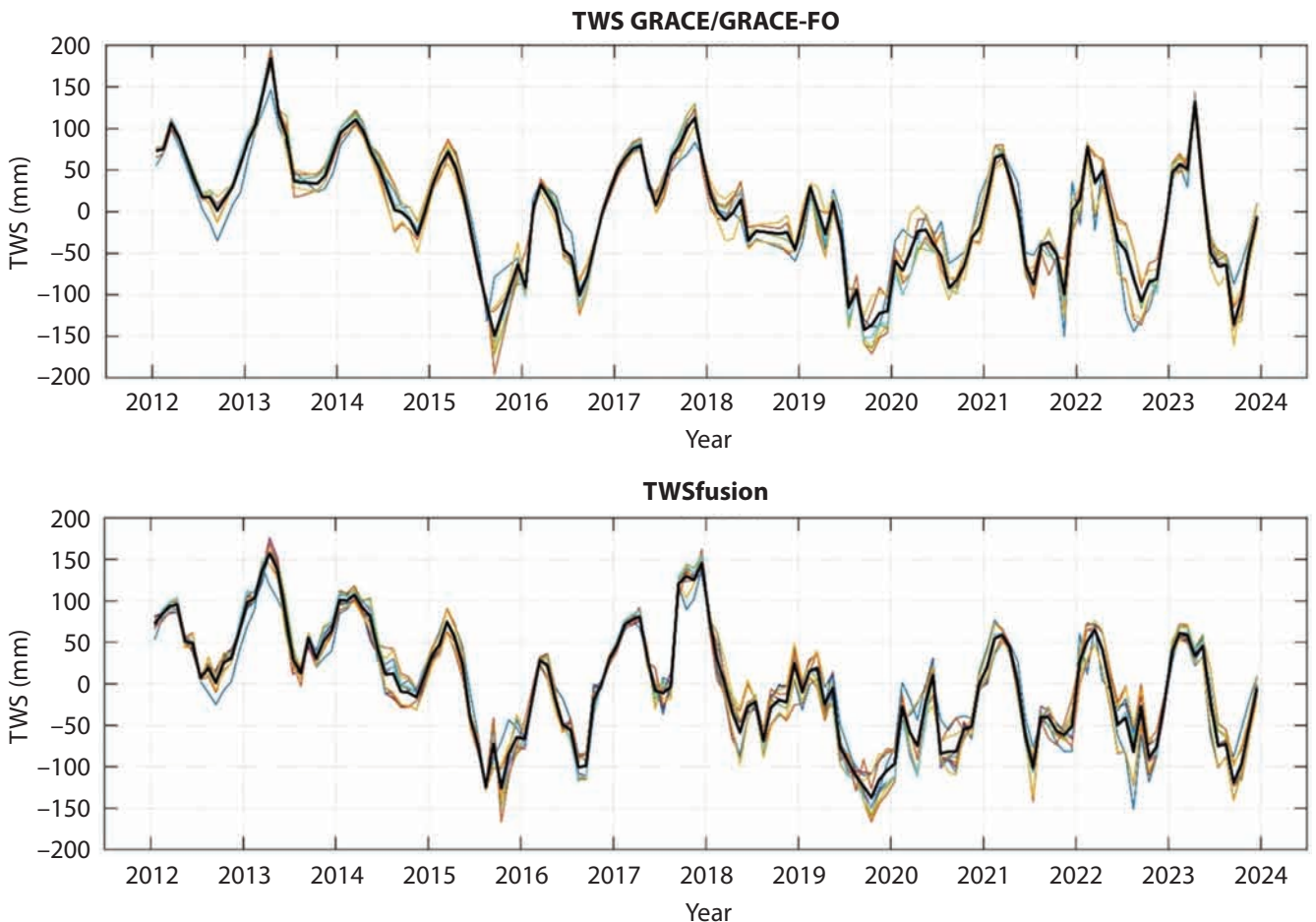


Fig. 2. Time series of TWS-GRACE for each grid computed from GRACE data alone (top) and from fusion of GRACE and P , ET , R data (bottom). The black thick line shows average across the entire area

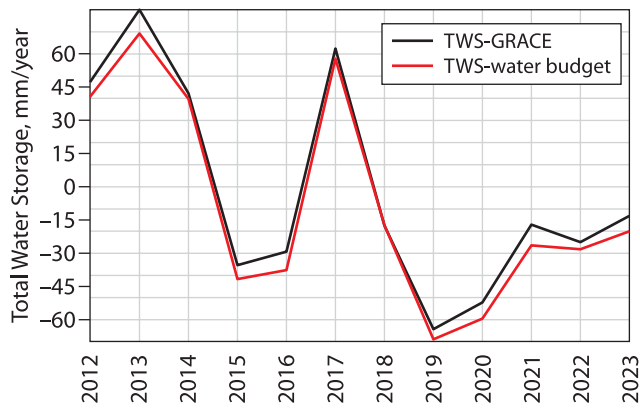


Fig. 3. Changes in TWS-GRACE and TWS-WB averaged for the subsequent years

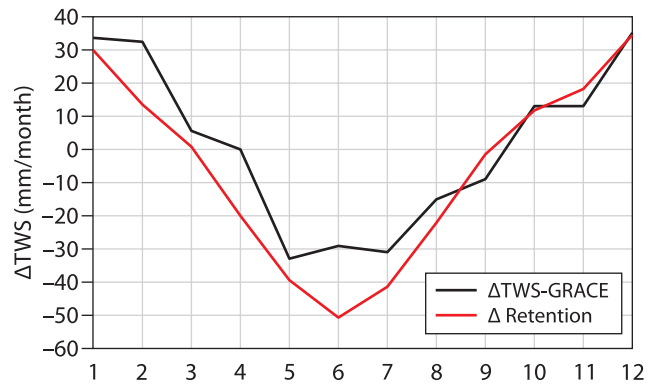


Fig. 4. Dynamics of Δ TWS-GRACE and Δ TWS-WB (Δ Retention) in 2012–2023

Noteworthy results emerged from comparing the monthly changes in TWS-GRACE (Δ TWS-GRACE) and changes in land retention (Δ TWS-WB) (Fig. 4). A negative retention value indicates a water deficit (i.e., ET and R exceed P). Δ TWS-GRACE and Δ TWS-WB series exhibit a division into a dry period (April to September), characterized by negative values and a reduction in water resources, and a wet period (October to March), marked by positive values. The discrepancies between Δ TWS-GRACE and Δ TWS-WB are notably larger during the dry period, peaking in June, which could suggest higher uncertainty in GRACE measurements during negative Δ TWS values, when water availability is lower.

We now analyse the correlation coefficients between TWS-GRACE and TWS-WB for individual years (Fig. 5) and months (Fig. 6), separately for the entire Bug River basin, as well as its upland (upper) and lowland (lower) regions. For the Upper Bug, the correla-

tion was slightly lower than for the Lower Bug. This is likely because TWS changes in the Upper Bug are more sensitive to precipitation variations, and precipitation in this area is more variable. This suggests that the lower correlation between GRACE data and water balance estimates may result from the inability to capture short-term precipitation events with the monthly GRACE measurement interval. Additionally, a noticeable decline in the correlation coefficient was observed in 2018 and 2020. In 2018, this was likely due to a disruption in GRACE observations (a one-year data gap between end of GRACE and start of GRACE-FO mission) and the associated uncertainty in filling the data gaps. In 2020, the low correlation was primarily caused by months of extreme precipitation and correspondingly high TWS-WB values, which were not detected in the GRACE measurements.

The correlation analysis for each month shows a slightly lower correspondence between TWS-GRACE

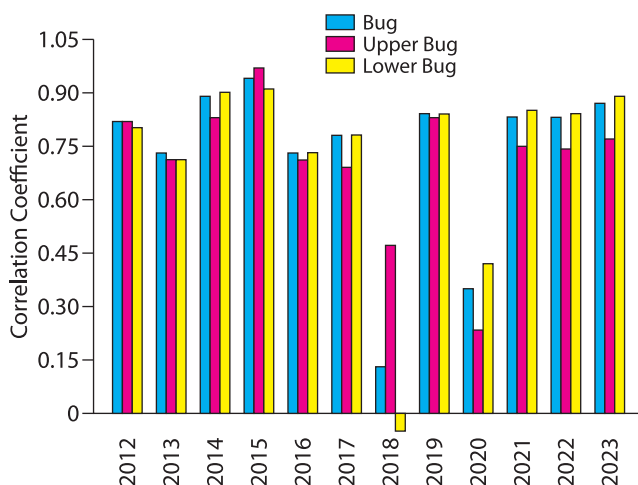


Fig. 5. Correlation coefficients between TWS-GRACE and TWS-WB for the entire Bug River basin, as well as the Upper and Lower Bug River Basins, for each month individually

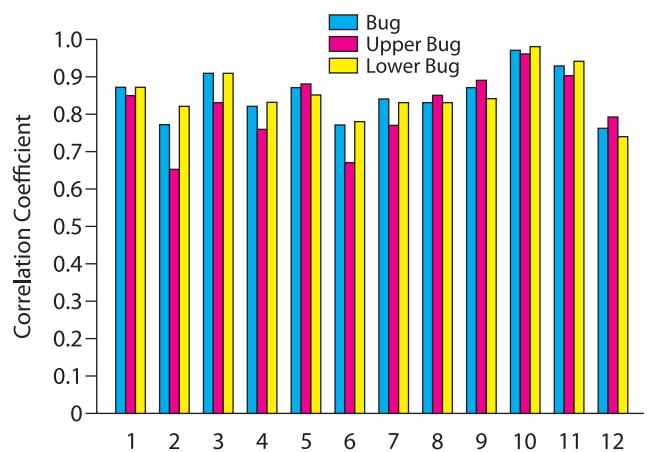


Fig. 6. Correlation coefficients between TWS-GRACE and TWS-WB for the entire Bug River basin, as well as the Upper and Lower Bug River Basins, for each month individually

and TWS-WB in the Upper Bug compared to the Lower Bug, especially in February and June (correlation coefficient below 0.7) (Fig. 6). These months also show the largest discrepancies in precipitation between the two regions, which are reflected in the TWS-WB estimates. However, due to the low temporal and spatial resolution of TWS-GRACE, these fluctuations are not captured, increasing the discrepancies with respect to the water balance approach. The smallest difference between the Upper and Lower Bug was observed in winter months, when ΔTWS has highest values (Fig. 4).

For these months the agreement between TWS-GRACE and TWS-WB is highest.

2. Comparison of TWS-GRACE series with and without fusion with P , ET and R data. The integration of P , ET , and R data into TWS-GRACE helped reduce errors in the GRACE solution by incorporating higher-resolution spatial data. Figure 7 presents a comparison between the original TWS-GRACE series and the corrected TWS-GRACE series, which was adjusted through fusion with P , ET , and R data, averaged over the entire Bug River Basin. As shown in Table 1, the impact of

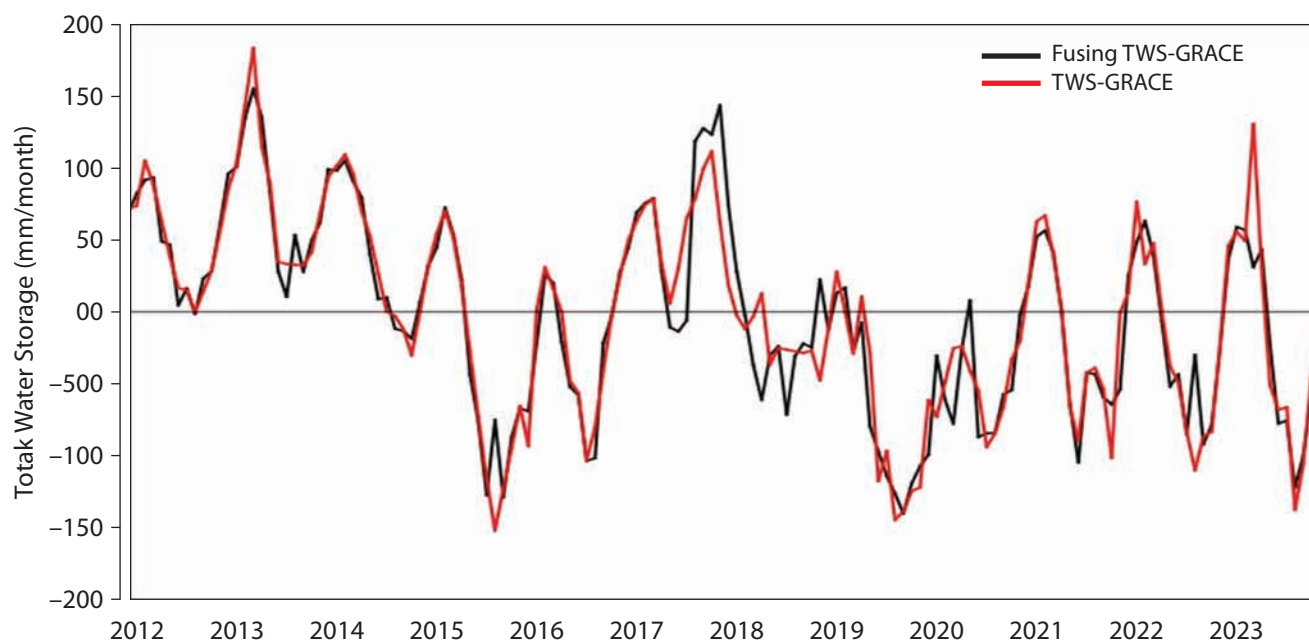


Fig. 7. Time series of the original TWS-GRACE and the TWS-GRACE corrected by merging with P , ET , and R data for the Bug River Basin from 2012 to 2023

Table 1. The minimum, maximum, and average values of TWS-GRACE and the TWS-GRACE corrected by merging with P , ET , and R data for the Bug River Basin for each year of the analysed period

| Year | Minimum | | | Maximum | | | Average | | |
|------|------------------|-----------|------------|------------------|-----------|------------|------------------|-----------|------------|
| | Fusing TWS-GRACE | TWS-GRACE | Difference | Fusing TWS-GRACE | TWS-GRACE | Difference | Fusing TWS-GRACE | TWS-GRACE | Difference |
| 2012 | -1.3 | -0.4 | -0.9 | 92.9 | 104.6 | -11.8 | 46.8 | 47.3 | -0.5 |
| 2013 | 10.4 | 32.0 | -21.6 | 154.5 | 182.5 | -28.0 | 77.7 | 79.9 | -2.2 |
| 2014 | -18.6 | -30.1 | 11.5 | 104.8 | 108.9 | -4.1 | 41.0 | 41.9 | -0.9 |
| 2015 | -128.4 | -151.3 | 22.9 | 72.2 | 69.9 | 2.3 | -31.6 | -35.3 | 3.7 |
| 2016 | -103.1 | -102.9 | -0.2 | 27.4 | 30.8 | -3.4 | -31.4 | -29.2 | -2.3 |
| 2017 | -13.6 | 6.0 | -19.6 | 143.1 | 111.1 | 32.0 | 64.6 | 62.4 | 2.2 |
| 2018 | -71.1 | -47.4 | -23.6 | 74.1 | 18.5 | 55.6 | -14.9 | -17.0 | 2.1 |
| 2019 | -139.7 | -144.1 | 4.4 | 16.7 | 27.7 | -11.0 | -66.5 | -64.3 | -2.2 |
| 2020 | -98.9 | -93.5 | -5.4 | 7.9 | -20.2 | 28.1 | -54.5 | -52.0 | -2.5 |
| 2021 | -104.3 | -101.2 | -3.1 | 56.3 | 66.7 | -10.4 | -22.0 | -16.9 | -5.1 |
| 2022 | -91.7 | -109.7 | 18.0 | 62.9 | 76.2 | -13.2 | -19.6 | -25.0 | 5.4 |
| 2023 | -121.6 | -136.9 | 15.4 | 58.7 | 130.1 | -71.3 | -19.3 | -13.2 | -6.2 |

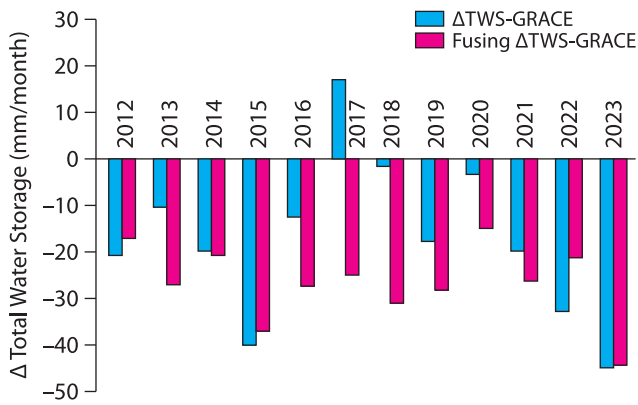


Fig. 8. Comparison of Δ TWS-GRACE without and with data fusion for the dry period (April–September) for the Bug River basin

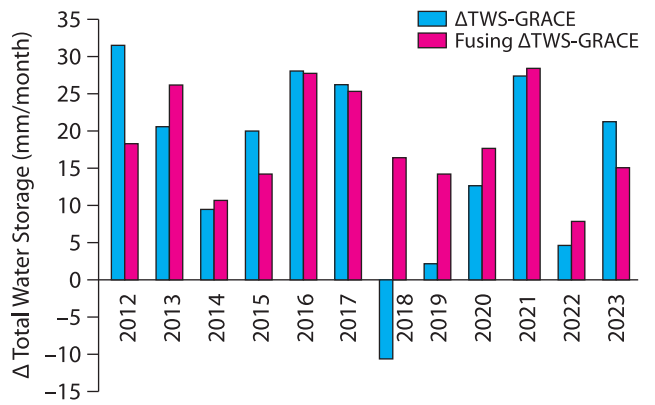


Fig. 9. Comparison of Δ TWS-GRACE without and with data fusion for the wet period (October–March) for the Bug River basin

the fusion on TWS-GRACE is most noticeable in a reduction of about 16% of the original maximum TWS values (except in 2017, 2018, and 2020), resulting in a slight decrease (approximately 7%) in the average TWS value.

Figure 8 compares Δ TWS-GRACE without and with data fusion during the dry period, using median values from April to September for the years 2012–2023. In this region, Δ TWS typically shows negative values, as *ET* surpass *P*. As seen in Fig. 4, Δ TWS-GRACE after fusion with *P*, *ET*, and *R* data tends to maintain negative values. The largest differences between the original and fused Δ TWS-GRACE occur in 2017 and 2018, during

the gap between the end of the GRACE mission and the beginning of GRACE-FO operations. This highlights the effectiveness of filling missing GRACE data through fusion with *P*, *ET*, and *R* data instead of using ARIMA method. Other years with notable discrepancies include 2013, 2016, and 2020, when GRACE recorded the lowest Δ TWS values (below -15 mm/month).

During the wet period (October–March), a significant difference in results is observed between the GRACE and GRACE-FO periods (Fig. 9). In the GRACE period, the correction of Δ TWS-GRACE is typically negative, while in the GRACE-FO mission, it is positive. The largest discrepancy between Δ TWS with

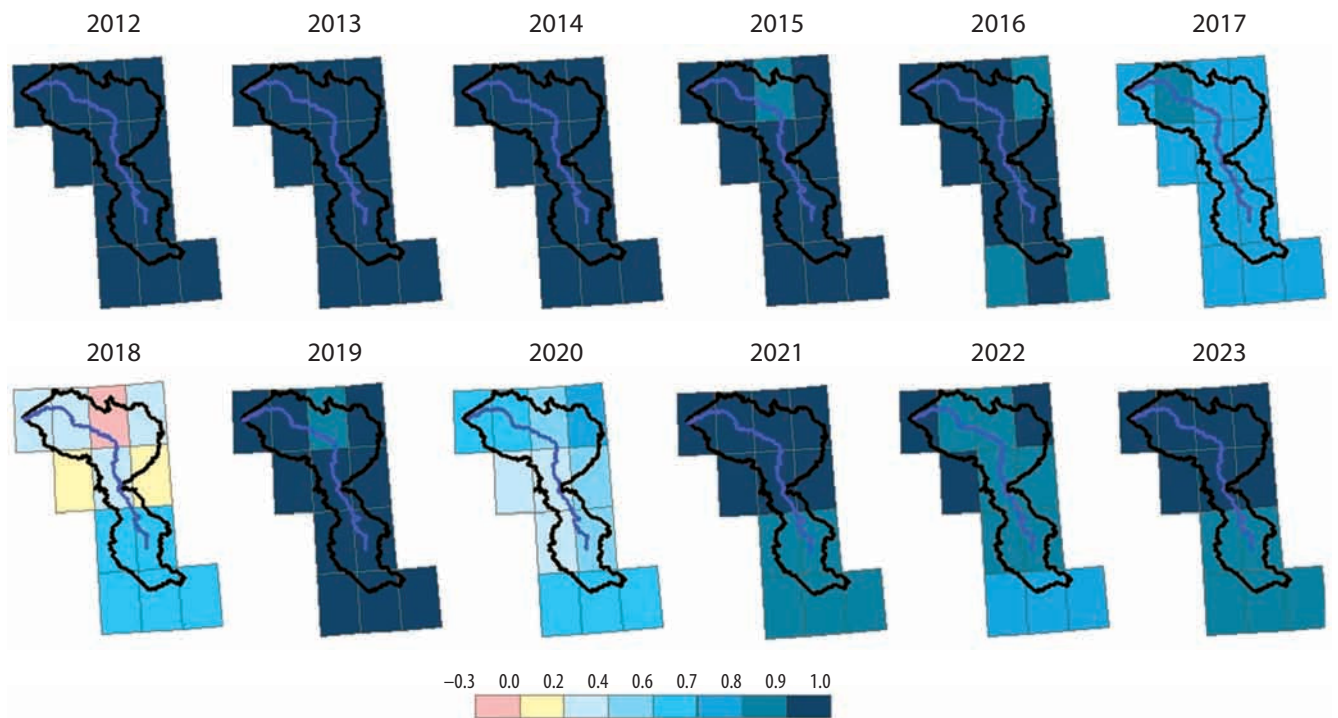


Fig. 10. Correlation coefficients between TWS-GRACE and TWS-GRACE corrected through fusion with *P*, *ET*, and *R* data for each grid cell within the Bug River Basin

and without fusion occurs in 2018, the year with interrupted observations. Similar to the dry period, the issue of GRACE measurement precision is evident, with the greatest compensation needed for 2019, which has the lowest Δ TWS-GRACE value. Overall, verification of TWS-GRACE calculations using high-resolution P , ET , and R data indicates that this method performs better in the wet period, where changes have a larger amplitude, compared to the dry period.

Figure 10 shows correlations between TWS-GRACE and TWS-GRACE after fusion with P , ET , and R data for each grid of the study area. The highest correlations were obtained in 2012–2014, a period of optimal GRACE measurement quality. In contrast, the lowest consistency between series were observed in 2017 and 2018, when GRACE measurements were unavailable. The year 2020 also exhibited a significantly lower correlation, confirming the increased error in GRACE-FO data during that time. Additionally, a slightly weaker correlation was noted in the upper part of the Bug River basin from 2021 to 2023. Overall, the fusion of TWS-GRACE with high-resolution data proved most beneficial in years with poor data quality or missing GRACE measurements, as well as in the upper part of the Bug River basin. In other years, TWS-GRACE data generally provided satisfactory results, with correlation coefficients above 0.9.

It is important to highlight that the fusion of TWS-GRACE with high-resolution P , ET , and R data significantly improved the agreement between TWS-GRACE and TWS-WB. For the Bug River basin, the RMSE decreased from 34.7 mm/month for the uncorrected TWS-GRACE to 14.9 mm/month after the data fusion.

3. TWS variability in the Bug River Basin in 2012–2023. A detailed analysis of TWS series consists of the study of trends, seasonal oscillations (sum of annual and semiannual signal) and non-seasonal variations. For this purpose, the TWS series for each grid were decomposed into appropriate components:

$$\text{TWS} = \text{TWS}_{\text{trend}} + \text{TWS}_{\text{seasonal}} + \text{TWS}_{\text{non-seasonal}} \quad (4)$$

Trends and seasonal signal were computed together by fitting a seasonal model to the series using the least-squares method. This model comprised of a first-degree polynomial defining the trend and the sum of sine waves with periods of one year and half a year, which determined the seasonal oscillation (sum of annual and semiannual signal), according to the following formula:

$$y(t) = a + b \cdot (t - t_0) + c \cdot \cos(\omega_a(t - t_0)) + d \cdot \sin(\omega_a(t - t_0)) + e \cdot \cos(\omega_s(t - t_0)) + f \cdot \sin(\omega_s(t - t_0)), \quad (5)$$

where y is the value of the series for the time $t = 1, \dots, 144$ (number of months), a is the intercept, b is a trend coefficient, c , d , e , f are coefficients of the fitted sinusoids, t_0 is a reference epoch (first month of analysis, here January 2012), ω_a , ω_s are annual and semiannual frequencies, respectively.

Non-seasonal changes were further obtained by removing trends and seasonal signals, thus capturing all other variations with periods both longer and shorter than seasonal changes. Figure 2 illustrates example TWS-GRACE series for the grid with the center coordinates 51.5° N, 24.5° E, highlighting the overall series (the original series without separation into seasonal and non-seasonal oscillations), seasonal components (the sum of annual and semiannual signals), annual oscillations, semiannual oscillations, non-seasonal changes, and the linear trend. The plot indicates that seasonal oscillation is primarily influenced by the annual signal, as the amplitudes of the semiannual variations are several times smaller. Consequently, this study will concentrate on the annual oscillation.

While a general downward trend in TWS in the Bug River Basin is observed throughout the entire period, the magnitude and sign interannual variability vary over shorter intervals (see Fig. 2). From 2012 to 2015, decrease TWS are most pronounced, followed by a shift to a growth in 2016–2018, and then a return to decrease in 2018–2020.

To identify the typical periodic oscillations of TWS in the studied region, we plotted the amplitude spectra computed using Fast Fourier Transform (FFT) (Fig. 11). The results reveal that the dominant oscillation is annual (1 cycle/year) with an amplitude of around 50 mm. A secondary significant oscillation is a 4-year cycle (0.25 cycle/year) with an amplitude of approximately 40 mm. Additionally, two other oscillations with amplitudes exceeding 10 mm include the 18-month (0.7 cycle/year) and 2-year (0.5 cycle/year) cycles.

By removing the seasonal signal from the TWS series, characterized in our case by a constant amplitude and phase, we can focus on non-seasonal variations, which are crucial for identifying extreme TWS events. Figure 12 presents the time series of non-seasonal TWS variations for the Bug River Basin. The figure reveals that the pattern of non-seasonal TWS changes is consistent across the entire basin. The most pronounced TWS minimum occurs in the second half of 2015, likely driven by exceptionally low precipitation in the region that year (Kundzewicz et al., 2018) and unusually high summer temperatures (Wypych et al., 2017). Another prominent minimum was recorded at the beginning of 2020. Study by Rakovec et al. (2022) emphasized that during the period 2018–2020, Europe experienced a series of exceptionally hot and dry weather conditions,

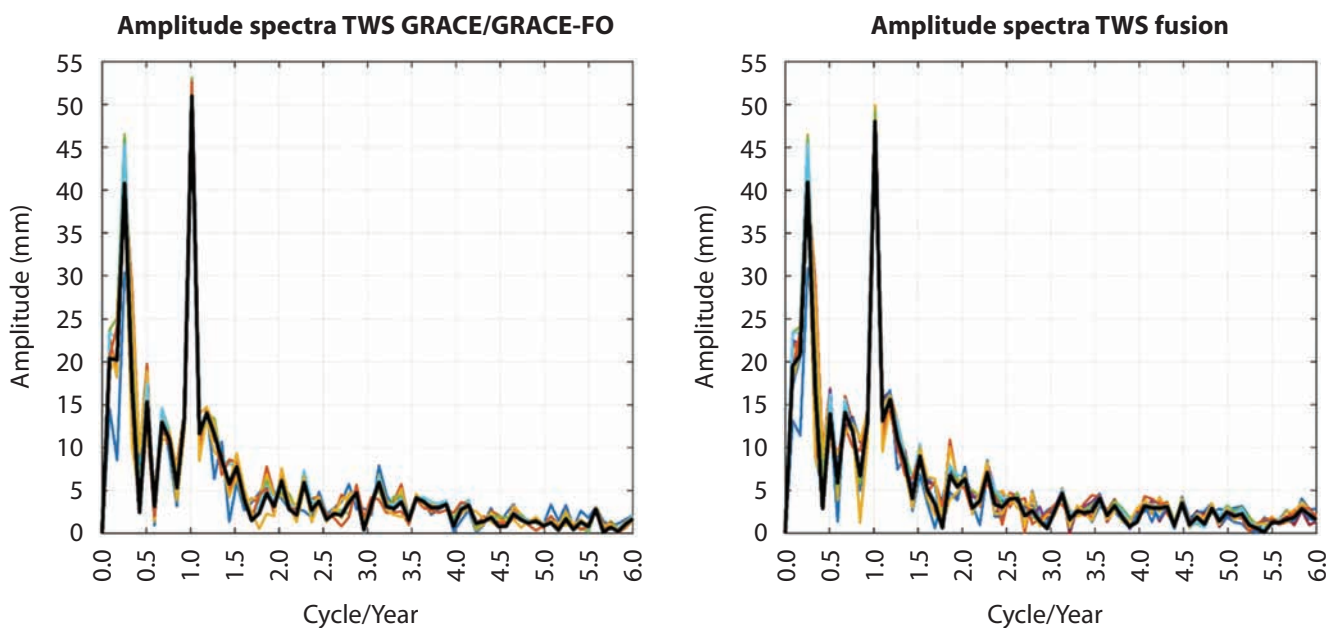


Fig. 11. FFT amplitude spectra of TWS-GRACE for each grid, calculated from GRACE data (left) and from the fusion of GRACE with *P*, *ET*, and *R* data (right). The black line represents the spectra for the whole area

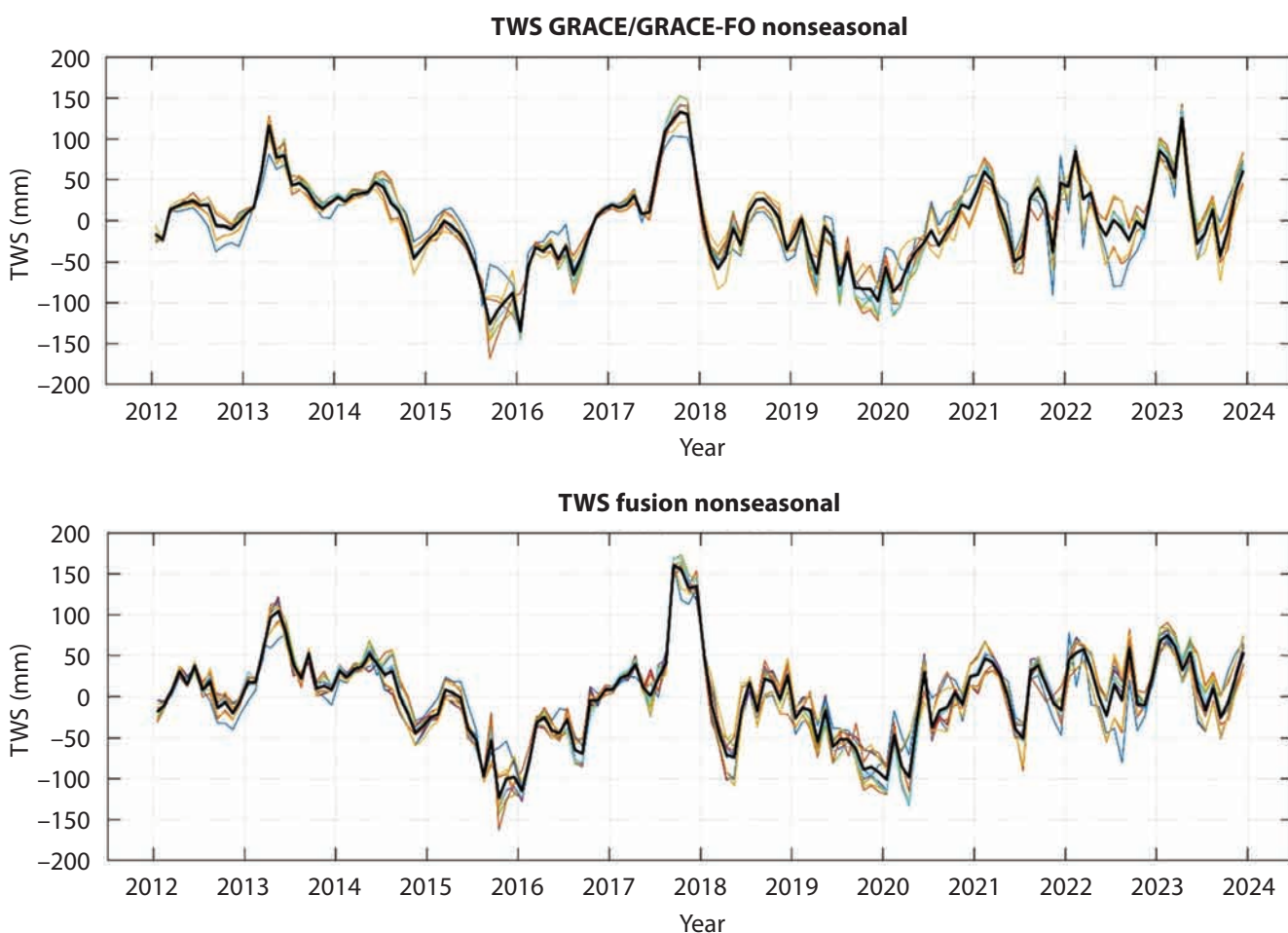


Fig. 12. Time series of non-seasonal TWS-GRACE variations for each grid calculated from GRACE data (top) and from the fusion of GRACE with *P*, *ET*, *R* data (bottom). The thick black line represents the average series across the entire area

which may have contributed to the observed extreme negative change in TWS. The authors identified this drought as having unprecedented intensity and duration of over two years (Rakovec et al. 2022).

Eliminating the seasonal signal from the TWS series let us focus on non-seasonal variations, which are crucial for detecting extreme TWS events. *Figure 12* illustrates the time series of non-seasonal TWS changes for the study area. The most significant TWS minimum occurred in the latter half of 2015, probably due to exceptionally low precipitation and unusually high summer temperatures in the region (Kundzewicz et al., 2018; Wypych et al., 2017). Another major minimum was observed at the start of 2020 and coincides with exceptionally hot and dry weather in the period between 2018 and 2020 in many parts of Europe (Rakovec et al., 2022).

In the Bug River Basin, maxima in TWS changes are observed, with the first in May–June 2013 and a stronger one in late 2017, both reflecting above-normal precipitation, which in extreme cases led to flooding. While the 2013 floods primarily impacted Germany, the Czech Republic, and Austria, Poland also experienced heavy rainfall (Merz et al. 2014). In 2017, rainfall in Poland exceeded the long-term average for most months (IMGW, 2021). Analysis of non-seasonal TWS variations (*Fig. 12*) shows that between 2012 and 2021, alternating anomalous minima and maxima in TWS occurred roughly every two years. However, in the past four years, this pattern has changed, with less pronounced peaks, signalling the disappearance of the 4-year oscillation.

With climate change, there is an increasing need to prepare for more frequent and intense extreme weather events, such as floods and droughts, which have occurred in quick succession, like the dry summer and heavy autumn rains in Poland in 2024 that caused floods in the south. Climate projections predict significant warming in the Bug River Basin throughout the 21st century. The SSP1 scenario, assuming sustainable development, forecasts a 2-degree rise in mean annual temperature by mid-century, with stabilization afterward. However, the more likely SSP5 scenario suggests a sharper temperature increase, potentially reaching 6 degrees by century's end (Snizhko et al. 2024). Additionally, Rakovec et al. (2022) highlighted that future droughts in Europe could be as intense as the 2018–2020 drought but with much longer durations.

CONCLUSIONS

GRACE data have relatively low spatial resolution, so we developed a statistical model to fuse TWS-GRACE with higher-resolution *P*, *ET*, and *R* data (Loomis

et al., 2019). The model assumes that TWS values are determined by the balance between the positive (*P*) and negative (*ET* and *R*) components of the water balance, and acts as a compensatory component based on any imbalance in the water balance. The water balance approach is well-established, transparent, and has been shown to be effective in analysing TWS and its contributing factors (Sahoo et al., 2011; Getirana et al., 2014; Long et al., 2015). However, inaccuracies in *P*, *ET*, and *R* data can accumulate in the water balance closure, leading to distortions in the actual TWS value (Li et al., 2023). Therefore, our model was designed so that the simulated TWS is partially corrected, with the “residual” being based on a Least Squares Regression model that adjusts the TWS-GRACE data according to the water balance closure.

The accuracy of simulations in the applied deterministic model largely depends on the accuracy of *P*, *ET*, and *R* data. Precipitation, the most crucial input variable, is sourced from the E-OBS database, which relies on *in-situ* station data and is known for its high quality in the target area (Cornes et al., 2018). Another key factor is *ET*, which in the study area is nearly equal to *P* in the water balance. Many studies highlight that *ET* carries significant uncertainty (15–30%), partly due to the sparse network of *in-situ* stations (Rodell et al., 2004; Sahoo et al., 2011; Li et al., 2023). Given these factors, the water balance estimate of TWS carries inherent uncertainty. However, it offers improved results over the interpolation of raw GRACE data, as it integrates physical data to enhance the spatial resolution of GRACE.

The absence of *in-situ* observations equivalent for TWS measurements makes validating the GRACE signal challenging. To address this, TWS-GRACE corrected through fusion with high-resolution *P*, *ET*, and *R* data was compared with TWS estimates derived from the water balance approach. After the fusion, a significant improvement in the agreement with TWS from the water balance method was observed, with RMSE decreasing from 34.7 to 14.9 mm/month. This is the first attempt to enhance the resolution of TWS-GRACE using water balance component measurement data. This approach demonstrates that TWS changes occur not only at the basin scale but also at the level of individual grid cells (Solovey et al., 2024).

Our results reveal that TWS variability in the study area is primarily influenced by precipitation, especially in the upper part of the Bug basin. As a result, the correction of TWS-GRACE mainly involved compensating for the significant temporal variability in precipitation, which GRACE cannot capture as effectively. The greatest improvements from fusing GRACE measurements with *P*, *ET*, and *R* data were observed in years with poor

GRACE data quality (2020) or periods with missing GRACE data (2017, 2018). In these years, the correlation between TWS-GRACE and TWS-WB increased from 0.13–0.35 to 0.99. The effect of data fusion in TWS-GRACE is most noticeable in the correction of extreme values. The developed model also addressed the over-estimation of the downward trend in TWS-GRACE.

Our data fusion approach, which integrates GRACE data with P , ET , and R , offers an alternative to extrapolating TWS-GRACE time series beyond the GRACE measurement period. The findings of our study could also

be valuable for downscaling GRACE data, as well as for spatial and temporal interpolation, one of challenges in water resources research.

Acknowledgements. This research was funded by National Science Centre, Poland, under the IMPRESS-U call (grant number 2023/05/Y/ST10/00234) and co-financed from national funds allocated for science in 2024. We also thank the Associate Editor, several anonymous reviewers for their constructive comments that improved this manuscript.

REFERENCES

- Becker, M., Meyssignac, B., Xavier, L., Cazenave, A., Alkama, R., and Decharme, B. (2011). Past terrestrial water storage (1980–2008) in the Amazon Basin reconstructed from GRACE and in situ river gauging data, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 533–546, <https://doi.org/10.5194/hess-15-533-2011>.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C., Ljung, G.M. (2016). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 5th ed., John Wiley and Sons Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2016, ISBN 978-1-118-67502-1.
- Chen, J., Cazenave, A., Dahle, C., Lovel, W., Panet, I., Pfeffer, J., and Moreira, L. (2022). Applications and Challenges of GRACE and GRACE Follow-On Satellite Gravimetry, *Surv Geophys.*, 43 (1), 305–345, <https://doi.org/10.1007/s10712-021-09685-x>.
- Cornes, R.C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E. J. M., & Jones, P.D. (2018). An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets. *J. of Geophys. Research: Atmospheres*, 123, 9391–9409, <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>.
- Forootan, E., Schumacher, M., Mehrnegar, N., Bezděk, A., Talpe, M.J., Farzaneh, S., Zhang, C., Zhang, Y., Shum, C.K. (2020). An Iterative ICA-Based Reconstruction Method to Produce Consistent Time-Variable Total Water Storage Fields Using GRACE and Swarm Satellite Data. *Remote Sensing*. 2020; 12 (10): 1639. <https://doi.org/10.3390/rs12101639>.
- Frappart, F., Seoane, L., and Ramillien, G. (2013). Validation of GRACE-derived terrestrial water storage from a regional approach over South America, *Remote Sens. of Environ.*, 137, 69–83, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.06.008>.
- Frappart, F., Ramillien, G., 2018. Monitoring Groundwater Storage Changes Using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Satellite Mission: A Review. *Remote Sens.* 10 (6), 829. <https://doi.org/10.3390/rs10060829>.
- Getirana, A., Dutra, E., Guimberteau, M., Kam, J., Li, H., Decharme, B. and Sheffield, J. (2014). Water balance in the Amazon basin from a land surface model ensemble. *J. of Hydrometeorol.*, 15, 2586–2614, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0068.1>.
- Gyawali, B., Ahmed, M., Murgulet, D., Wiese, D. N. (2022). Filling Temporal Gaps within and between GRACE and GRACE-FO Terrestrial Water Storage Records: An Innovative Approach. *Remote Sensing*, 14 (7): 1565. <https://doi.org/10.3390/rs14071565>.
- IMGW (2021). Climate of Poland 2020. Available online: <https://www.imgw.pl/sites/default/files/2021-04/imgw-pib-klimat-polski-2020-opracowanie-final-eng-pojedyncze-min.pdf> (accessed 2024-11-03).
- Hassan, A., and Jin, S. (2016). Water storage changes and balances in Africa observed by GRACE and hydrologic models, *Geodesy and Geodynamics, Volume 7, Issue 1*, 39–49, <https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.03.002>.
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D. and New, M. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research*, 114, D20119. <https://doi.org/10.1029/2009JD011799>
- Jing, W., Zhang, P., Zhao, X. (2019). A comparison of different GRACE solutions in terrestrial water storage trend estimation over Tibetan Plateau. *Sci Rep*, 9, 1765. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38337-1>.
- Klok, E.J. and Klein Tank, A.M.G. (2008). Updated and extended European dataset of daily climate observations. *International Journal of Climatology*, 29, 1182–1191. <https://doi.org/10.1002/joc.1779>.
- Kostrzewski, A., & Abramowicz, D. (2023). Kompleksowe badania środowiska geograficznego, *Geoprzeźrzeń*, no. 7, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, ISBN 978-83-7986-456-0, 136 p. [in polish].
- Kundzewicz, Z. W., Piniewski, M., Mezghani, A., Okruszko, T., Piskwar, I., Kardel, I., Øystein, H., Szcześniak, M., Szwed, M., Benestad, R., Marcinkowski, P., Graczyk, D., Dobler, A., Førland, E.J., O’Keefe, J., Chorynski, A., Parding, K.M., Haugen, J.E. (2018). Assessment of climate change and associated impact on selected sectors in Poland. *Acta Geophys* 66, 1509–1523. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0220-4>.
- Li, C., Yu, Q., Zhang, Y., Ma, N., Tian, J., & Zhang, X. (2023). Dominant drivers for terrestrial water storage changes are different in northern and southern China. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2022JD038074, <https://doi.org/10.1029/2022JD038074>.
- Long, D., Yang, Y., Wada, Y., Hong, Y., Liang, W., Chen, Y., Yong, B., Hou, A., Wei, J., Chen, L. (2015). Deriving scaling factors using a global hydrological model to restore GRACE total water storage changes for China’s Yangtze River Basin, *Remote Sens. of Environ.*, 168, 177–193, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.003>.
- Loomis, B.D., Luthcke, S.B., and Sabaka, T.J. (2019). Regularization and error characterization of GRACE mascons, *J. Geod.*, 93,1381–1398, <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01252-y>.
- Merz, B., Elmer, F., Kunz, M., Mühr, B., Schröter, K., & Uhlemann-Elmer, S. (2014). The extreme flood in June 2013 in Germany. *La Houille Blanche*, 100 (1), 5–10. <https://doi.org/10.1051/lhb/2014001>
- Miro, M.E.; Famiglietti, J.S. (2018). Downscaling GRACE Remote Sensing Datasets to High-Resolution Groundwater Storage Change Maps of California’s Central Valley. *Remote Sens.*, 10, 143, <https://doi.org/10.3390/rs10010143>.
- Nanteza, J., de Linage, C.R., Thomas, B.F., and Famiglietti, J.S. (2016). Monitoring groundwater storage changes in com-

- plex basement aquifers: An evaluation of the GRACE satellites over East Africa, *Water Resour. Res.*, 52, 9542–9564, doi: 10.1002/2016WR018846.
- Pascal, C., Ferrant, S., Selles, A., Maréchal, J.-C., Paswan, A., and Merlin, O. (2022). Evaluating downscaling methods of GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) data: a case study over a fractured crystalline aquifer in southern India, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 4169–4186, <https://doi.org/10.5194/hess-26-4169-2022>.
- Preisendorfer, R.W. (1988). *Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography*. Elsevier, 425 p.
- Rakovec, O., Samaniego, L., Hari, V., Markonis, Y., Moravec, V., Thober, S., et al. (2022). The 2018–2020 multi-year drought sets a new benchmark in Europe. *Earth's Future*, 10, e2021EF002394. <https://doi.org/10.1029/2021EF002394>.
- Ran, J., Ditmar, P., Klees, R. (2018). Optimal mascon geometry in estimating mass anomalies within Greenland from GRACE. *Geophys J Int* 214 (3), 2133–2150. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy242>.
- Rodell, M., Famiglietti, J.S., Chen, J., Seneviratne, S.I., Viterbo, P., Holl, S., and Wilson, C.R. (2004). Basin scale estimates of evapotranspiration using GRACE and other observations, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L20504, <https://doi.org/10.1029/2004GL020873>.
- Rowlands, D.D., Luthcke, S.B., Klosko, S.M., Lemoine, F.G.R., Chinn, D.S., McCarthy, J.J., Cox, C.M., and Anderson, O.B. (2005). Resolving mass flux at high spatial and temporal resolution using GRACE intersatellite measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L04310.
- Sahoo, A., Pan, M., Troy, T.J., Vinukollu, R.K., Sheffield, J., Wood, E.F. (2011). Reconciling the global terrestrial water budget using satellite remote sensing, *Remote Sens. of Environ.*, 115, Issue 8, 1850–1865, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.009>.
- Save, H. (2020). CSR GRACE and GRACE-FO RL06 Mascon Solutions v02, <https://doi.org/10.15781/cgq9-nh24>.
- Save, H., Bettadpur, S., Tapley, B.D. (2016). High resolution CSR GRACE RL05 mascons, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121. <https://doi.org/10.1002/2016JB013007>.
- Savoca, M.E., Senay, G.B., Maupin, M.A., Kenny, J., Perry, F.C.A. (2013). Actual evapotranspiration modeling using the operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) approach. Scientific Investigations Report 2013-5126. Groundwater Resources Program. U.S. Geological Survey, <https://doi.org/10.3133/sir20135126>.
- Scanlon, B.R., Zhang, Z., Save, H., Wiese, D.N., Landerer, F.W., Long, D., Longuevergne, L., Chen, J. (2016). Global evaluation of new GRACE mascon products for hydrologic applications. *Water Resour Res* 52 (12), 9412–9429. <https://doi.org/10.1002/2016WR019494>.
- Senay, G.B. (2018). Satellite psychrometric formulation of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) model for quantifying and mapping evapotranspiration. *Applied engineering in agriculture*, 34 (3), 555–566. <https://doi.org/10.13031/aea.12614>.
- Snizhko, S., Didovets, I., Shevchenko, O., Yatsiuk, M., Hattermann, F.F., Bronstert, A. (2024). Southern Bug River: water security and climate changes perspectives for post-war city of Mykolaiv, Ukraine. *Frontiers in Water*, 6: 1447378, <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1447378>
- Somorowska, U. (2021). Czasowa zmienność i przestrzenne zróżnicowanie ewapotranspiracji w zlewni nizinnej rzeki Łąsicy, *Prace i Studia Geograficzne*, 66.3, 35–46, <https://doi.org/10.48128/pisg/2021-66.3-03>.
- Solovey, T., Śliwińska-Bronowicz, J., Janica, R., Brzezińska, A., (2024). High-resolution groundwater storage changes from GRACE/GRACE-FO using assimilation models and hydrogeological observations, <https://www.globalwaterstorage.info>.
- Sun, A.Y., Scanlon, B.R., Zhang, Z., Walling, D., Bhanja, S.N., Mukherjee, A., & Zhong, Z. (2019). Combining physically based modeling and deep learning for fusing GRACE satellite data: Can we learn from mismatch? *Water Resour. Res.*, 55, 1179–1195, <https://doi.org/10.1029/2018WR023333>.
- Tapley, B.D., Watkins, M.M., Flechtner, F. et al. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nat. Clim. Chang.*, 9, 358–369, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>.
- Tapley, B.D., Bettadpur, S., Watkins, M., Reigber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophys. Res. Lett.* 31 (9), L09607. <https://doi.org/10.1029/2004GL019920>.
- Urban, G., Kuchar, L., Kempnińska-Kasprzak, M., and Łaszyca, E. (2022). A Climatic water balance variability during the growing season in Poland in the context of modern climate change, *Meteorol. Z.*, Vol. 31, No. 5, 349–365. <https://doi.org/10.1127/metz/2022/1128>.
- van Dijk, A.I.J.M., Renzullo, L.J., Wada, Y., and Tregoning, P. (2014). A global water cycle reanalysis (2003–2012) merging satellite gravimetry and altimetry observations with a hydrological multi-model ensemble, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 2955–2973, <https://doi.org/10.5194/hess-18-2955-2014>.
- Velicogna, I., Mohajerani, Y.A.G., Landerer, F., Mougino, J., Noel, B., et al. (2020). Continuity of ice sheet mass loss in Greenland and Antarctica from the GRACE and GRACE Follow-On missions. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087291. <https://doi.org/10.1029/2020GL087291>.
- Vishwakarma, B.D., B. Devaraju, Sneeuw, N. (2018). What Is the Spatial Resolution of GRACE Satellite Products for Hydrology? *Remote Sens.*, 10, 852, <https://doi.org/10.3390/rs10060852>.
- Vishwakarma, B.D., Zhang, J. & Sneeuw, N. (2021). Downscaling GRACE total water storage change using partial least squares regression. *Sci Data*, 8, 95, <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00862-6>.
- Watkins, M.M., D.N. Wiese, D.N. Yuan, C. Boening, and Landerer, F.W. (2015). Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 2648–2671. <https://doi.org/10.1002/2014JB011547>.
- Wypych, A., Sulikowska, A., Ustrnul, Z., Czekierda, D. (2017). Temporal Variability of Summer Temperature Extremes in Poland. *Atmosphere* 8(3), 51. <https://doi.org/10.3390/atmos8030051>.
- Yin, W., Zhang, G., Liu, F., Zhang, D., Zhang, X., and Chen, S. (2022). Improving the spatial resolution of GRACE-based groundwater storage estimates using a machine learning algorithm and hydrological model, *Hydrogeol. J.*, 30, 947–963. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02447-4>.
- Zhang, T., Bian, S., Ji, B., Li, W., Zong, J., & Yuan, J. (2024). The Extraction of Terrestrial Water Storage Anomaly from GRACE in the Region with Medium Scale and Adjacent Weak Signal Area: A Case for the Dnieper River Basin. *Remote Sens.*, 16 (12), 2124. <https://doi.org/10.3390/rs16122124>.
- Zhong, D., Wang, S., & Li, J. (2021). A self-calibration variance-component model for spatial downscaling of GRACE observations using land surface model outputs. *Water Resour. Res.*, 57, e2020WR028944, <https://doi.org/10.1029/2020WR028944>.

Тетяна Соловей¹

ORCID 0000-0001-8949-4075

Tatiana.solovey@pgi.gov.pl

Юстина Слівінська-Броновіч²

ORCID 0000-0001-7502-5243

jsliwinska@cbk.waw.pl

Рафал Яніца¹

ORCID 0009-0001-7142-5570

rafal.janica@pgi.gov.pl

Агнешка Бжезінська¹

ORCID 0009-0006-2007-9053

agnieszka.brzezinska@pgi.gov.pl

¹ Польський геологічний інститут —
Національний науково-дослідний інститут,
Раковецька 4, PL00975 Варшава, Польща,

² Центр космічних досліджень Польської академії наук,
Бартицька 18а, PL00716, Варшава, Польща.

**ЗМІНИ ВОДНИХ РЕСУРСІВ
ТРАНСКОРДОННОГО БАСЕЙНУ
РІЧКИ ЗАХІДНИЙ БУГ, ВИЯВЛЕНІ
НА ПІДСТАВІ СУПУТНИКОВИХ
СПОСТЕРЕЖЕНЬ GRACE
І ВОДНО-БАЛАНСОВИХ РОЗРАХУНКІВ**

Центральна і Південна Європа потерпають від посухи у зв'язку зі зростанням температури повітря та випаровування на тлі відносно сталої кількості опадів. Згідно з супутниковими даними GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) в басейні Західного Бугу втрати водних ресурсів за період 2012–2023 рр. оцінюються на рівні

$8,8 \pm 5,2$ мм/рік. Серед методів наших досліджень був аналіз просторово-часових закономірностей змін сумарних запасів вологи водозбору $\pm \Delta W$ (в ґрунтах, поверхневих водних об'єктах, підземних водах), які оцінювались на підставі водно-балансових розрахунків і супутникових спостережень GRACE. Опрацьовано модель інтеграції даних опадів (P), випаровування з поверхні водозбору (ET) і поверхневого стоку (Q) з даними ΔW -GRACE. В моделі прийнято, що величина ΔW розраховується з пропорції між додатною (P) і від'ємною частинами водного балансу (ET і Q) і є компенсаційною складовою, яку часто називають нев'язкою водного балансу. Отримані моделі регресії застосовано для корегування даних ΔW -GRACE, які характеризуються низькою просторовою і роздільною здатністю. Кореляційний аналіз між ΔW -GRACE та інтегрованим ΔW зі складовими водного балансу дозволив ідентифікувати неточності вимірювань GRACE і заповнити прогалини в рядах спостережень. Опрацьована модель значно покращила відповідність між даними ΔW -GRACE і ΔW -водного балансу (похибка RMSE зменшилася з 34,7 до 14,9 мм/місяць). Встановлено, що мінливість ΔW детермінована опадами, особливо у верхній частині басейну р. Західний Буг. Найбільш важливими є результати, отримані для років з гіршою якістю або відсутністю спостережень GRACE (2017, 2018 рр.). З водно-балансових розрахунків спадкова тенденція водних ресурсів виглядає дещо слабшою, ніж зі спостережень GRACE. Причина цього може полягати у неврахуванні у водно-балансових розрахунках підземного стоку. Представлений метод становить альтернативу для екстраполяції ΔW поза періодом спостережень GRACE. Результати досліджень придатні для збільшення роздільної здатності GRACE, виконання просторової і часової інтерполяції.

Ключові слова: GRACE, водні ресурси, водний баланс, р. Західний Буг, інтеграція даних.



М.В. Савенець

ORCID: 0000-0001-9429-6209
savenets@uhmi.org.ua

Л.М. Надточій

ORCID: 0000-0003-3038-5960
onoslyuda@uhmi.org.ua

Т.В. Козленко

kozlenkot@ukr.net

К.В. Комісар

enkomisar@ukr.net

А.П. Уманець

ORCID: 0009-0008-4867-4430
umanets@uhmi.org.ua

Н.С. Жемера

zermalda@ukr.net

УДК 551.510.4

DOI: <https://doi.org/10.15407/Meteorology2024.06.017>

ЩОДО НЕУЗГОДЖЕНОСТІ ДАНИХ РІЗНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ВИКИДИ ТА ПРИЗЕМНИЙ ВМІСТ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ

Розроблення плану заходів і стратегій щодо зменшення забруднення атмосферного повітря передбачають використання даних викидів та концентрацій за тривалий період часу. На таких масштабах зростає роль похибок, що може призвести до створення неефективних заходів. У статті представлено дослідження узгодженості даних різних джерел між собою, зокрема офіційних інвентаризацій викидів, модельних даних викидів сервісу Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), даних концентрацій забруднюючих речовин вимірних на стаціонарних постах спостережень гідрометеорологічних організацій, та даних приземного вмісту із реаналізу CAMS для монооксиду вуглецю (CO), діоксиду азоту (NO₂) та діоксиду сірки (SO₂). Дослідження розкрили значну неузгодженість між різними базами даних, що часто відображають зовсім різну міжрічну мінливість і тенденції у змінах показників. У той час як викиди переважно зменшуються, концентрації у більшості міст продовжують зростати за даними спостережень та часто значущо не змінюються за даними реаналізу. При цьому узгодження між даними викидів за різними джерелами складає лише 12 випадків із набору місто — домішка. Узгодження між даними концентрацій забруднюючих речовин виявлено лише у 3 містах для CO та 4 для SO₂. Різниця між обсягами викидів, навіть за високих кореляцій, може складати один порядок для деяких міст. У статті представлено перелік міст для кожної із досліджуваних забруднюючих речовин, де спостерігається узгодження різних даних і таких даних, що можуть бути як взаємодоповнюючими, так і взаємозамінними.

Ключові слова: атмосферне повітря, забруднення, викиди, концентрації, реаналіз, спостереження.

ВСТУП

Незадовільна якість атмосферного повітря у багатьох країнах є критичною проблемою (Manisalidis et al., 2020). Забруднене повітря здатне впливати на зростання смертності населення (Shaddick et al., 2020) та погіршувати стан екосистем (Smith, 1992). Враховуючи атмосферну циркуляцію, питання забруднення атмосфери набуло глобальної актуальності (Rentschler and Leonova, 2023), над вирішенням якого працюють багато міжнародних організацій і робочих груп (Vilcins et al., 2024). Проблема якості атмосферного повітря в Україні виникла ще з часів індустріалізації протягом 20 сторіччя (Shahgedanova and Burt, 1994). З розпадом СРСР, зміною характеру виробництва та закриттям частини промислових підприємств проблема забруднення атмосферного повітря в українських містах не зникла (Баштаннік та ін., 2014), а в останні десятиріччя зростання авто-

транспорту стало вагомим фактором емісії шкідливих домішок (Melnyuchenko et al., 2023). Як наслідок, проблема забруднення атмосферного повітря в Україні продовжує активно досліджуватися (наприклад, Чугай та Сафранов (2020), Savenets et al. (2022), Yatsenko et al. (2018), та багато інших праць). З початком російської окупації Криму та Донбасу у 2014 р., і з повномасштабним вторгненням у 2022 р., актуалізувалися ще дві проблеми: різноманітні додаткові воєнно-обумовлені джерела викидів та проблематичність встановлення реальних змін, що відбуваються із забрудненням атмосфери в окупованих районах та над територіями охоплених активними бойовими зіткненнями (Maluytska et al., 2024).

Управління якістю атмосферного повітря й розроблення стратегій зменшення рівнів забруднення сьогодні є важливими рушійними силами для покращення стану атмосферного повітря і створення

безпечного навколишнього середовища (Krupnick, 2008; Puiu et al., 2022). Вирішення цих питань потребує оперування даними у відносно довготерміновому часовому масштабі, що охоплює від кількох років до десятиліть (Vedrenne et al., 2015). На основі даних про тенденції викидів та тенденції зміни концентрацій забруднюючих речовин обираються оптимальні для конкретного міста, території чи країни план заходів (Galán-Madruga, 2021; Qiu et al., 2022). Значні проблеми виникають тоді, коли територія, що потребує реалізації планів із покращення якості атмосферного повітря не покрита наземними спостереженнями, або ж відсутня достовірна інформація про обсяги викидів (Chastko and Adams, 2019).

Вирішити проблеми обмеженості інформації про викиди та концентрації забруднюючих речовин частково можна із застосуванням сіткових даних інвентаризацій та реаналізів (Ryu and Min, 2021; Inness et al., 2019). Сіткові дані інвентаризацій викидів можуть бути як загалом для різних джерел викидів і забруднюючих речовин (наприклад, Inness et al., 2019), так і для наслідків визначених процесів (наприклад, Sofiev et al., 2012) або домішок (наприклад, Granier et al., 2011). Подібні інвентаризації складають основу початкових даних для чисельних моделей хімічного транспорту, що дозволяють змодельовати вміст забруднюючих речовин над заданою територією, незалежно від наявності чи відсутності там спостережень (Brasseur et al., 1997). На їх основі отримуються сіткові дані концентрацій.

В Україні існують як проблеми із покриттям наземними спостереженнями (Babak et al., 2020), так і проблеми достовірності даних викидів, особливо тих, які надають промислові підприємства та недосконале врахування викидів автотранспорту. З одного боку, ліквідувати ці недоліки можна із використанням хімічних реаналізів та відкритих сіткових даних. З іншого боку, самі ж реаналізи та сіткові дані частково залежать від офіційних інвентаризацій викидів і зведень, а також можуть формувати значні неточності через наближеність апроксимації реальних викидів та похибок параметризації при обчисленні вмісту забруднюючих речовин (Malik et al., 2024). Усі ці чинники разом формують неточності в усіх наявних джерелах баз даних, які можуть справляти значущі наслідки для точності оцінок фактичного стану забруднення. І як наслідок, розроблені стратегії чи плани заходів, які повністю покладаються на наявні дані, можуть бути неефективними.

Метою проведених досліджень є виявлення неузгодженості різних джерел даних про викиди та забруднюючі речовини в атмосферному повітрі в окремих містах України, що використовуються при плануванні та розробленні стратегій, а також відбір

релевантних випадків для застосування відкритих модельних реаналізів для урбанізованих районів України.

Результати досліджень у статті представлені у чотирьох основних структурних елементах: (1) опису початкових даних та методики досліджень; (2) аналізу неузгодженості у тенденціях викидів забруднюючих речовин, розрахованих за різними джерелами даних; (3) аналізу неузгодженості у міжрічних змінах приземних концентрацій забруднюючих речовин; (4) взаємному порівнянню різних джерел даних із подальшим відбором релевантних випадків узгодження даних.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У представлених дослідженнях використано чотири джерела даних про викиди та приземні концентрації забруднюючих речовин на території України описаних нижче, на основі яких можна сформулювати сумісну вибірку близько 20 років. Уся інформація збиралася для тих міст, у яких наявні стаціонарні пости спостережень за забрудненням атмосферного повітря гідрометеорологічних організацій України (рис. 1). Це дозволило порівняти між собою інформацію для більшості міст із різних баз даних. Виняток у представленій роботі становлять міста АР Крим, через неможливість відновлення достатньої бази даних для проведення надійного порівняльного аналізу. Для аналізу обрані такі забруднюючі речовини як монооксид вуглецю (CO), діоксид азоту (NO₂) та діоксид сірки (SO₂), так як ці домішки є змога порівняти між собою за різними джерелами даних. У базах даних викидів наявні дані оксидів азоту (NO_x) та оксидів сірки (SO_x), маса викидів яких обчислюється таким чином, що є еквівалентною до маси викидів NO₂ та SO₂. У зв'язку із тим, що дані NO_x та SO_x перераховані до маси викидів NO₂ та SO₂ відповідно, позначатимемо викиди та концентрації однією хімічною формулою — як діоксид.

Інформацію про викиди забруднюючих речовин зібрано із офіційних інвентаризацій, представлених у національних доповідях Міндовкілья (доступні за посиланням на офіційному сайті <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/natsionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-pryrodного-seredovyssha-v-ukrayini/>, дата звернення 05.11.2024), зведень із регіональних доповідей (<https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/regionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-seredovyssha-v-ukrayini/>, дата звернення 05.11.2024), а також офіційних сайтів тих міст, у яких наявні стаціонарні пости спостережень. Далі по тексту для всіх цих джерел даних використовуватимемо термін “офіційні зведення”.



Рис. 1. Картошка досліджуваних міст із наявними стаціонарними постами спостережень за забрудненням атмосферного повітря

Сіткові дані викидів забруднюючих речовин взято із реаналізу Copernicus Atmosphere Monitoring Service — CAMS (Inness et al., 2019), зокрема набору даних під назвою CAMS global emission inventories (доступний за посиланням <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/datasets/cams-global-emission-inventories?tab=overview>, дата звернення 11.12.2024). Ця база даних покриває період із 2000 по 2020 рр. Горизонтальна просторова роздільна здатність антропогенних емісій складає 0.1° за широтою та довготою. Оригінальні дані CAMS представлені у $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ та були перераховані на обсяг викидів у тисячі тон за рік для усього квадрату $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. У порівнянні із конкретним містом було обрано ті ґridи, що покривають територію заданого міста та обчислено сумарну масу викидів. Це дозволило порівняти дані реаналізу CAMS із даними офіційних зведень, де також представлена сумарна маса викидів.

Дані наземних спостережень за концентраціями забруднюючих речовин взято із архівів Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського, представлених у вигляді середньомісячних значень, осереднених для усього міста.

Дані приземних концентрацій із реаналізу CAMS представлені у наборі даних CAMS European air quality reanalyses (доступні за посиланням <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/datasets/cams-europe-air-quality-reanalyses?tab=overview>, дата звернення 05.11.2024). Ця база даних покриває період із 2013 року. Просторова роздільна здатність складає 0.1° за широтою та довготою. Дані концентрацій усереднено для заданого міста на основі ґридів, що покривають територію міста.

Враховуючи наявні дані за усіма обраними джерелами, період досліджень обмежується 2000–2020 рр. для аналізу інвентаризацій викидів та їх взаємного порівняння, 2001–2021 рр. (співмірний за тривалістю період) для приземних концентрацій забруднюючих речовин за даними спостережень, та 2013–2021 рр. для концентрацій за даними CAMS. Відповідно, лінійні тренди розраховано для представлених періодів, тоді як взаємне порівняння між викидами та концентраціями здійснено для років із попарним часовим покриттям відповідних даних.

Після проведення підготовки даних, описаної вище, для усіх часових рядів викидів і концентрацій були розраховані лінійні тренди. Значущість лінійно-

го тренду перевірялася із застосуванням критерію Стьюдента з 95% рівнем забезпеченості результату. Спочатку між собою порівнювалися коефіцієнти трендів викидів за даними CAMS та офіційними зведеннями, що перераховані у% на рік для зручності представлення. На основі аналізу величини трендів проведено оцінювання узгодженості тенденцій змін викидів, а також наявність різких змін у часовому ході за абсолютними значеннями (у тис. т). За подібною схемою проведено порівняння тенденцій концентрацій забруднюючих речовин між даними із реаналізу CAMS та спостереженнями на стаціонарних постах. Додатково здійснено обчислення коефіцієнтів кореляції Пірсона з метою аналізу сили кореляційного зв'язку між даними різних джерел окремо для викидів і концентрацій. Проведений аналіз дозволив виявити усі міста, де спостерігаються неузгодженості у міжрічних змінах досліджуваних показників. З метою встановлення переліку міст та забруднюючих речовин, для яких можна застосовувати ті чи інші джерела даних, здійснено розрахунок кореляцій Пірсона між даними викидів та концентрацій, а також виокремлено міста, де дані викидів CAMS і офіційних зведень можуть бути взаємозамінними.

РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

1. Щодо неузгодженості міжрічних тенденцій викидів забруднюючих речовин. Загалом, неузгодженість даних офіційних зведень та інвентаризацій із даними різноманітних реаналізів й сіткових

модельних інвентаризацій спостерігалось завжди. Проте, у масштабах окремо вибраних років, подібне неузгодження становить проблему переважно для проведення точних оцінок під час наукових досліджень або для моделювання перенесення забруднюючих речовин під час аналізу викидів промислових підприємств. У випадку, якщо неузгодженість даних спостерігається на довготривалих часових масштабах та тенденціях, то це вже несе загрозу державному плануванню заходів щодо зменшення ризиків забруднення атмосферного повітря та стратегій зменшення викидів і розвитку промисловості на майбутнє. Більш того, на основі даних викидів та сформованих концентрацій забруднюючих речовин визначаються граничні допустимі рівні викидів, що вкрай важливо для питань проектування меж санітарно-захисних зон та введення в експлуатацію нових промислових потужностей. Саме на основі міжрічних тенденцій стало можливим виявити критичні неузгодженості між даними різних джерел інформації.

Як для даних викидів реаналізу CAMS, так і для офіційних зведень, типовим є зменшення викидів у переважній більшості міст для усіх досліджуваних забруднюючих речовин (див. *табл. 1*). Проте, загалом спостерігається багато неузгодженостей як у часовій динаміці зміни викидів, так і у значеннях трендів. Для кращого візуального сприйняття подібності тенденцій використані кольори для клітинок, що відповідають різним трендам (див. примітку до *табл. 1*).

Таблиця 1. Часові тренди викидів за даними реаналізу CAMS та офіційними зведеннями за період 2000–2020 рр. (у % на рік)

| Місто | CAMS | | | Офіційні зведення | | |
|------------------|------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | CO | NO ₂ | SO ₂ | CO | NO ₂ | SO ₂ |
| Біла Церква | -3.5 | -3.0 | | | | |
| Бровари | -3.5 | -6.8 | -5.5 | | | |
| Вінниця | -5.5 | -4.6 | 1.6 | 4.7 | | -5.1 |
| Горішні Плавні | 4.4 | 12.0 | 7.6 | | | 10.4 |
| Дніпро | -4.9 | -5.8 | -4.2 | -5.5 | -4.8 | -3.0 |
| Житомир | -4.8 | -6.4 | -5.3 | -10.9 | | 6.4 |
| Запоріжжя | | -4.6 | | -3.1 | -3.2 | -4.1 |
| Івано-Франківськ | -4.8 | -5.4 | -5.9 | -4.6 | -4.3 | -7.5 |
| Ізмаїл | -4.2 | | -2.4 | -5.3 | | -8.6 |
| Кам'янське | -3.1 | -7.6 | -5.5 | | -2.1 | -5.4 |
| Київ | -4.0 | -6.5 | -4.9 | -7.9 | -2.5 | |
| Краматорськ | | | 5.8 | | | |
| Кременчук | | 4.2 | | | -3.6 | |
| Кривий Ріг | -2.7 | -6.0 | -3.1 | -3.2 | -1.4 | -7.2 |
| Кропивницький | -4.9 | -6.4 | -5.6 | -4.9 | | |
| Луганськ | -7.0 | -5.4 | -5.5 | | | |

Закінчення таблиці 1

| Місто | CAMS | | | Офіційні зведення | | |
|------------------|------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | CO | NO ₂ | SO ₂ | CO | NO ₂ | SO ₂ |
| Луцьк | -4.4 | -4.1 | -5.6 | -9.9 | | -13.7 |
| Львів | -4.9 | -3.9 | | | -4.4 | |
| Маріуполь | -2.5 | -6.7 | -4.9 | | -4.8 | -3.0 |
| Миколаїв | -3.7 | -6.0 | -4.2 | -7.6 | -5.2 | -9.9 |
| Обухів | -6.9 | | -6.8 | | | |
| Одеса | -2.5 | -6.1 | -4.1 | | -5.0 | -9.6 |
| Олександрія | -4.1 | -6.6 | -5.8 | -20.5 | -10.9 | -21.0 |
| Полтава | | | | -10.3 | -4.6 | 6.8 |
| Рівне | -5.6 | -4.6 | -2.9 | -8.9 | | -4.7 |
| Рубіжне | -2.6 | -2.6 | -5.5 | 3.6 | | |
| Світловодськ | | -3.2 | -6.4 | | | |
| Сіверськодонецьк | | 1.8 | | -7.8 | -6.7 | -12.9 |
| Слов'янськ | -4.8 | -6.1 | -5.6 | -6.3 | | |
| Суми | -5.4 | -4.7 | -6.3 | | | |
| Тернопіль | -4.2 | -6.0 | -5.7 | | -3.0 | |
| Українка | -2.1 | | | | | |
| Ужгород | | -3.6 | -2.9 | | | |
| Харків | -5.5 | -5.5 | -4.9 | -5.4 | -2.7 | |
| Херсон | -5.2 | -4.7 | | | | |
| Хмельницький | -4.4 | -5.4 | -6.1 | -9.6 | -3.2 | -7.2 |
| Черкаси | -3.7 | -4.1 | -3.8 | -9.0 | 6.8 | |
| Чернівці | -3.5 | -6.6 | -4.9 | | -11.8 | -10.8 |
| Чернігів | -4.0 | -6.4 | -5.1 | -6.7 | 1.5 | |

Примітка: ■ — зменшення викидів; ■ — зростання викидів; ■ — не значущі зміни; ■ — неможливо розрахувати тренди.

За даними реаналізу CAMS (табл. 1) тенденції до зростання усіх досліджуваних забруднюючих речовин (CO, SO₂, та NO₂) спостерігалися лише у Горішніх Плавнях; у Краматорську та Вінниці мало місце зростання SO₂, а у Кременчузі і Сіверськодонецьку за NO₂.

Зростання викидів CO у Горішніх Плавнях склало 4.4% на рік. У 7 містах не спостерігалось значущих трендів за даними реаналізу. Найінтенсивніше зменшення характерне для Луганську (тренд на рівні -7.0% від середньорічних значень), Обухова (-6.9%), Вінниці та Харкові (-5.5%). Необхідно звернути увагу на випадки наявності кількох різних періодів зі змінами, що не узгоджуються із загальним трендом (див. рис. 2а). Наприклад, у Горішніх Плавнях, незважаючи на позитивні тренди, така тенденція була обумовлена лише різким зростанням у 2012 році. Фактично, за період 2000–2011 рр. тенденцій не спостерігалось, тоді як у 2012 р. простежується значне зростання викидів. Починаючи з 2013 р. має місце значуще поступове зменшення викидів забруднюючих речовин. На рис. 2а червоним кольором позначені тренди, їх рівняння та коефіцієнти

детермінації за окремі часові інтервали. Таке різке зростання викидів у 2012 р. викликає значні сумніви щодо надійності даних реаналізу та однорідності вхідних даних при створенні інвентаризацій. Іншим потенційно недостовірним значенням можуть бути аномально низькі викиди CO у 2006 р., що також добре прослідковується на рис. 2а.

У той же час, в Обухові спостерігається поступове зменшення викидів CO за даними реаналізу CAMS, що є одним із найбільш інтенсивних: від 1.0–1.2 тис. т на рік на початку 2000-х рр., до 0.2–0.3 тис. т у 2019–2020 рр. (рис. 2б). Настільки інтенсивні зменшення викидів також викликають підозру щодо неадекватності представлення викидів за даними реаналізу CAMS.

Зростання викидів NO₂ досягло у Горішніх Плавнях 12.0%, у Кременчузі 4.2%, та у Сіверськодонецьку 1.8%. У п'яти містах не спостерігалось значущих трендів. Найінтенсивніше зменшення викидів NO₂ характерне для Кам'янського (-7.6%), Броварів (-6.8%) та Маріуполя (-6.7%). Зростання викидів NO₂ у Горішніх Плавнях, подібно до CO, характеризується різким зростанням викидів у 2012 році.

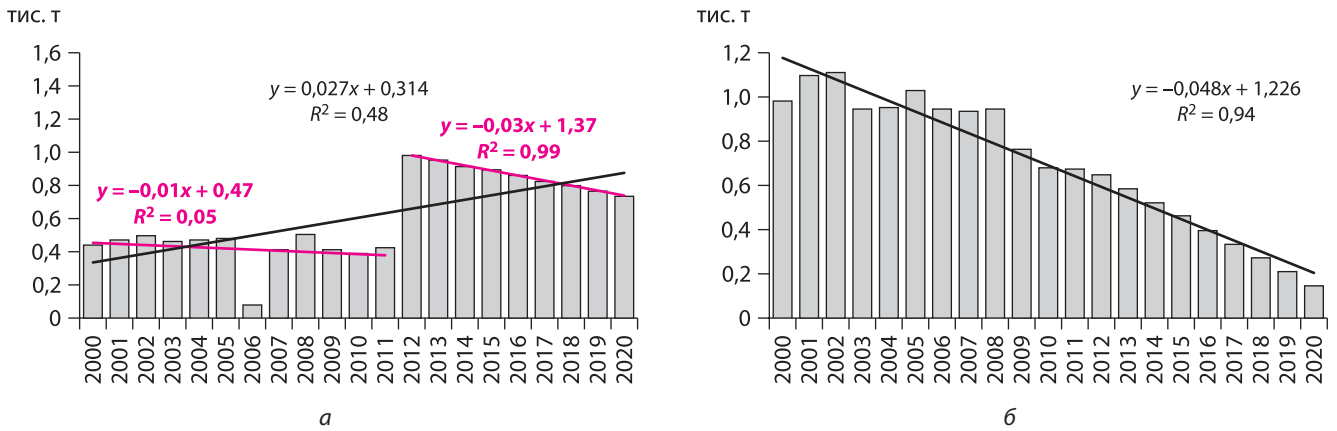


Рис. 2. Часова зміна викидів CO за даними реаналізу CAMS на прикладі Горішніх Плавнів (а) та Обухова (б) за період 2000–2020 рр. із наведеними рівняннями трендів і їх коефіцієнтами детермінації (R^2)

Така ситуація не характерна для Кременчука та Сіверськодонецька, де зростання викидів NO_x менш інтенсивне, проте стабільне і без різких перепадів. Це вкотре ставить під сумнів надійність даних викидів із реаналізу CAMS для можливості його використання у дослідженнях чи розрахунках без додаткових перевірок.

Зростання викидів SO_2 за даними CAMS у Горішніх Плавнях досягло 7.6%, у Краматорську 5.8% та у Вінниці 1.6%. У 8 містах не виявлено значущих трендів. Викиди SO_2 найінтенсивніше зменшувалися в Обухові (до -6.8%), Світловодську (-6.4%) та Сумах (-6.3%). Зазначимо, що Полтава є єдиним містом, де не виявлено значущих трендів для усіх забруднюючих речовин. Викиди SO_2 у Горішніх Плавнях (на відміну від додатних трендів Вінниці й Краматорську) мають нетипове зростання у вже згаданому раніше 2012 році (рис. 3а). З рис. 3а чітко видно дві різні статистично значущі тенденції до зменшення викидів (відповідні тренди, рівняння та коефіцієнти детермінації позначено червоним кольором). При цьому, за загальний період маємо додатний тренд через

зростання абсолютних величин протягом одного 2012 року. Зменшення викидів SO_2 відбувалося поступово, проте найбільш інтенсивні тренди (наприклад у Обухові, рис. 3б) викликають сумніви щодо надійності параметризованих джерел викидів.

Зміни викидів забруднюючих речовин, характерні для реаналізу CAMS, ймовірно за все є наслідком зменшення ролі промислових підприємств закладених у дані інвентаризацій. Величини зменшення викидів вуглецево- та сірковмісних сполук вказують, що менша роль, ймовірно, обумовлена меншою кількістю спаленого твердого палива. Винятком із переліку є Горішні Плавні, де викиди забруднюючих речовин інтенсивно зростають, однак це зростання викликає підозри до надійності заданих інвентаризацій.

На жаль, дані офіційних інвентаризацій викидів та підготовлених зведень в Україні також характеризуються значною кількістю проблем та недостатньою надійністю інформації. Переважна кількість міст характеризується зменшенням викидів забруднюючих речовин (див. табл. 1). Лише у 6 містах за

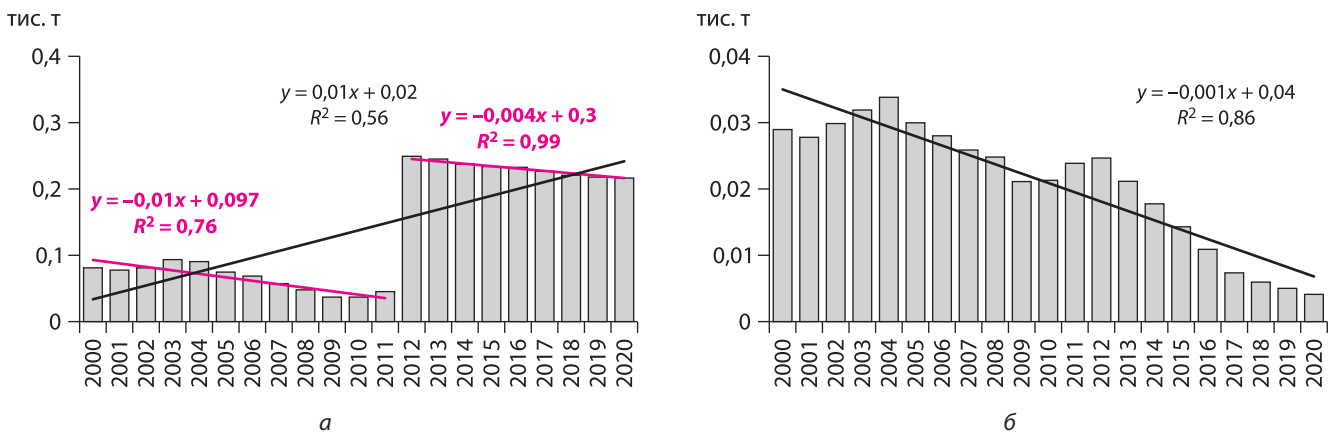


Рис. 3. Часова зміна викидів SO_2 за даними реаналізу CAMS на прикладі Горішніх Плавнів (а) та Обухова (б) за період 2000–2020 рр. із наведеними рівняннями трендів і їх коефіцієнтами детермінації (R^2) (масштаб осі ординат є різним для наочності)

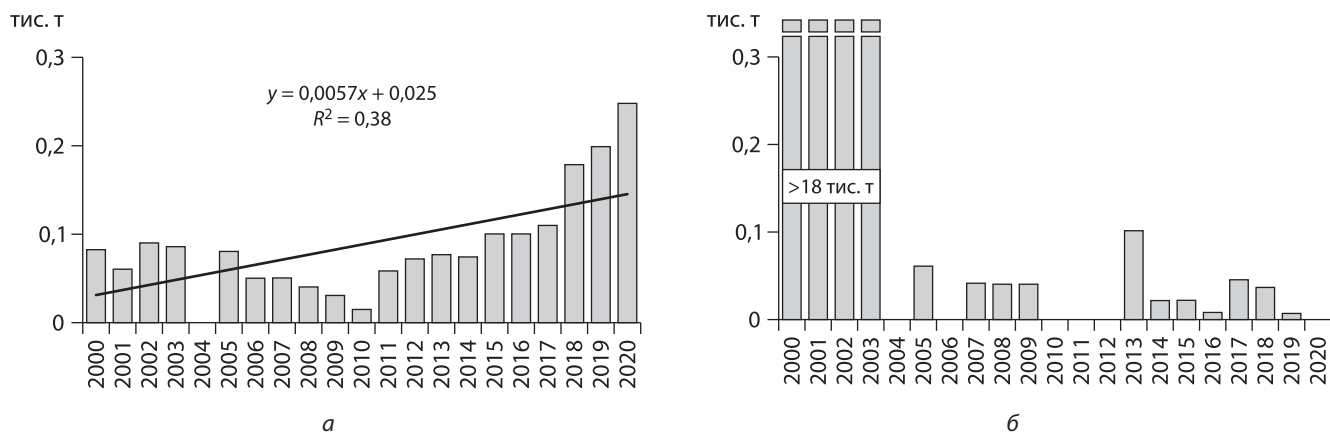


Рис. 4. Часова зміна викидів SO₂ за даними офіційних зведень на прикладі міст Житомир (а) та Олександрія (б) за період 2000–2020 рр. із наведеним рівнянням тренду і його коефіцієнту детермінації (R^2)

окремими домішками спостерігалось зростання викидів, зокрема у Черкасах і Чернігові за викидами NO₂; Горішніх Плавнях і Житомирі за викидами SO₂; Рубіжному та Вінниці за викидами CO. У 8 містах не вдалося встановити тенденції через відсутність або незадовільну якість даних із офіційних зведень, зокрема у Білій Церкві, Броварах, Херсоні, Краматорську, Луганську, Обухові, Сумах та Україніці.

За даними офіційних зведень зростання CO у Вінниці досягало 4.7% на рік, тоді як у Рубіжному близько 3.6% до її окупації (табл. 1). У той же час, часову динаміку такого зростання важко прослідкувати через значні пропуски у рядах опублікованих даних викидів. Встановлені тренди радше пов'язують зростання викидів від 0.4–0.6 тис. т на початку 2000-х рр. до 1.0–1.2 тис. т у 2016–2017 рр. Найінтенсивніше зменшення викидів CO характерне для Олександрії (–20.5%), Житомира (–10.9%) та Полтави (–10.3%). У 10 містах не спостерігалось значущих трендів CO. У більшості міст зменшення викидів CO не є поступовим, а умовно поділяється на два окремі періоди істотного зменшення: 2004–2005 рр. та 2011–2012 рр. Тому, у випадку зменшення за даними офіційних зведень доречніше вести мову не про тенденції, а про окремі значно відмінні між собою періоди з різними обсягами викидів.

Зростання викидів NO₂ спостерігалось у Черкасах (близько 6.8% на рік) та Чернігові (1.5%). Зростання викидів у Черкасах, у першу чергу, асоційоване до наслідків діяльності підприємства ПрАТ “Азот”. Зменшення викидів NO₂ було особливо значним у Чернівцях (–11.8%), Олександрії (–10.9%) та Сіверськодонецька до його окупації (–6.7%). У 11 містах значущих трендів у викидах NO₂ не виявлено. Зменшення викидів NO₂ також не було поступовим, як у випадку за даними реаналізу CAMS. Має місце різкий спад на межі 2012–2013 рр. Враховуючи подібність такого спаду у різних містах, стає сумнівним

фактичне одночасне зменшення для усієї території України. Тому дані, або є частково нерепрезентативні, або мали місце зміни методичних підходів обрахунку обсягів викидів, про що не має жодної інформації у офіційних звітах та доповідях.

Викиди SO₂ зросли у Горішніх Плавнях на близько 10.4% на рік, та у Житомирі на 6.4%. Найінтенсивніше зменшення викидів знову ж таки було характерне для Олександрії (майже –21%), Луцьку (–13.7%), Сіверськодонецьку до його окупації (–12.9%) та Чернівцях (–10.8%). У 12 містах значущі тренди не виявлено. У той час як зростання викидів SO₂ у Горішніх Плавнях та Житомирі виглядає більшою мірою реалістичним (рис. 4а), інтенсивне зменшення у Олександрії (рис. 4б), ймовірно, варто віднести до типових помилок, допущених під час створення інвентаризацій. Зміна у обсягах викидів зменшилася із 18 тис. т до близько 0.8 тис. т.

Як і до реаналізу CAMS, офіційні зведення викидів представлені у національних та регіональних доповідях часто виглядають недостатньо надійно. У той час як відбувалося зменшення викидів внаслідок поступового зупинення роботи підприємств протягом останніх 20 років перед повномасштабним російським вторгненням, спостерігалось і стрімке зростання автотранспорту, особливо у великих містах. Наявні викиди із офіційних зведень радше відображають зміну викидів стаціонарних джерел, тоді як врахування ролі автотранспорту досі залишається вкрай недооціненим.

2. Щодо неузгодженості міжрічних тенденцій концентрацій забруднюючих речовин. Тенденції зміни модельних концентрацій, отриманих із реаналізу CAMS та виміряних концентрації на стаціонарних постах спостережень гідрометеорологічних організацій суттєво відрізняються від викидів розглянутих джерел інвентаризацій (див. табл. 2). Тенденції вмісту забруднюючих речовин до повно-

Таблиця 2. Часові тренди приземних концентрацій за даними реаналізу CAMS та стаціонарними постами спостережень мережі гідрометеорологічних організацій за період 2001–2021 рр. (у % на рік)

| Місто | CAMS | | | Пости спостережень | | |
|-------------------|------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| | CO | NO ₂ | SO ₂ | CO | NO ₂ | SO ₂ |
| Біла Церква | | -4.7 | | 2.6 | 2.2 | 1.6 |
| Бровари | | -5.0 | | | 2.7 | 6.4 |
| Вінниця | | | | -6.7 | 8.2 | -5.8 |
| Горішні Плавні | | | | -9.9 | | 14.3 |
| Дніпро | | | | | 2.3 | 5.8 |
| Житомир | | | | -3.2 | 2.8 | 4.8 |
| Запоріжжя | 19.2 | | 27.0 | -5.6 | | |
| Івано-Франківськ | | | -19.0 | -2.1 | | -8.2 |
| Ізмаїл | | 6.7 | | 1.8 | -1.7 | -3.9 |
| Кам'янське | | -4.7 | | | | |
| Київ | | -6.6 | | -2.9 | 2.3 | 10.1 |
| Краматорськ | 3.6 | | | | | |
| Кременчук | | | | -6.8 | 5.7 | 18.9 |
| Кривий Ріг | | | | -2.1 | | |
| Кропивницький | | | | -2.0 | 1.2 | |
| Луганськ | | 3.9 | 19.8 | | | |
| Луцьк | | | | | 3.1 | |
| Львів | | | | -1.8 | 1.5 | -7.0 |
| Маріуполь | | 7.6 | 36.2 | | | |
| Миколаїв | | 4.5 | | 3.7 | | 2.3 |
| Обухів | | -4.2 | | 4.4 | 1.6 | 5.2 |
| Одеса | | | | | -3.1 | -1.2 |
| Олександрія | | | | | | |
| Полтава | | | | | 1.7 | |
| Рівне | | | | | | |
| Рубіжне | | | | | | |
| Світловодськ | | | | 4.2 | 2.5 | -4.3 |
| Сіверськодоонецьк | | | | | | |
| Слов'янськ | | | | | | |
| Суми | 3.2 | 2.2 | | 2.6 | 2.4 | 1.7 |
| Тернопіль | | | | | 3.3 | -6.9 |
| Українка | | -4.5 | | 6.1 | 4.2 | 4.6 |
| Ужгород | | | | | | |
| Харків | | | | | -1.1 | |
| Херсон | | 5.1 | | | 4.5 | |
| Хмельницький | | | -9.2 | 4.8 | | |
| Черкаси | | | | -1.3 | 1.4 | -4.1 |
| Чернівці | | | -9.8 | -4.9 | 3.1 | |
| Чернігів | | | | | 1.2 | 1.5 |

Примітка: ■ — зменшення викидів; ■ — зростання викидів; ■ — не значущі зміни; ■ — неможливо розрахувати тренди.

масштабного вторгнення за даними реаналізу CAMS були набагато рідше значущими у порівнянні із тенденціями викидів (див. табл. 1). Значущі зміни спостерігалися лише у трьох містах для CO, 6 містах для SO₂, та 12 містах для NO₂.

Значуще зростання приземних концентрацій CO за даними реаналізу CAMS спостерігалося у Запоріжжі (19.2%), Краматорську (3.6%) та Сумах (3.2%). За даними реаналізу зменшення CO не зафіксовано у жодному із досліджуваних міст,

що сильно суперечить власне інвентаризаціям CAMS.

Варто звернути увагу на інтенсивність зростання вмісту SO_2 у Маріуполі (36.2%), Запоріжжі (27.0%) та Луганську (19.8%), незважаючи на окупацію останнього із 2014 р. Зростання SO_2 може свідчити про зміну у використанні твердого палива відносно природного газу. За умов зростання використання твердого палива або мазуту на підприємствах, зростання SO_2 є типовим наслідком. У той же час спостерігається зменшення вмісту SO_2 в обласних центрах на заході: Івано-Франківську (-19.0%), Чернівцях (-9.8%) та Хмельницькому (-9.2%).

NO_2 характеризується найбільшою кількістю значущих трендів. Зокрема зростання концентрацій виявлено у Маріуполі (7.6%), Ізмаїлі (6.7%), Херсоні (5.1%), Миколаєві (4.5%), Луганську (3.9%) та Сумах (2.2%). Як бачимо, найчастіше зростання NO_2 за даними реаналізу CAMS приурочене до міст півдня та південного сходу України. Зменшення концентрацій NO_2 виявлено у Києві (-6.6%), Броварах (-5.0%), Білій Церкві та Кам'янському (у обох близько -4.7%), Україні (-4.5%) та Обухові (-4.2%). Окрім Кам'янського, інші міста розташовуються у Київській області, що свідчить про наявність подібного чинника при параметризації викидів у реалізаціях моделей CAMS. Викликає недовіру у цих даних зменшення вмісту NO_2 у Києві, що суперечить наявним супутниковим даним (Savenets et al., 2022), які вказують на зростання концентрацій через збільшення кількості автотранспорту.

У порівнянні з даними реаналізу CAMS, набагато більше значущих трендів виявлено за даними наземних спостережень (табл. 2). Незважаючи на відсутність даних у 5 містах, значущі тренди виявлено у 20 містах для CO , 23 містах для NO_2 та 20 містах для SO_2 .

Зменшення концентрацій CO за даними наземних спостережень найінтенсивніше спостерігалось у Горішніх Плавнях (-9.9%), Кременчузі (-6.8%) та Вінниці (-6.7%). Інтенсивне зростання CO спостерігалось в Україні (6.1%), Хмельницькому (4.8%) та Обухові (4.4%).

Зміни CO у містах переважно пов'язані з роботою промислових підприємств. Так, зростання CO в Україні (рис. 5б) має бути наслідком змін у роботі Трипільської ТЕЦ у період до повномасштабного вторгнення. Зокрема це може відбуватися через збільшення використання твердого палива. Враховуючи це зростає типом для інших забруднюючих речовин, ця причина є найбільш імовірною. CO у Горішніх Плавнях надходило переважно внаслідок роботи підприємств гірничодобувної промисловості, що ймовірно могло зменшитися після 2012 року (рис. 5а), проте достовірної інформації про це немає.

Концентрації NO_2 зростають у більшості міст, що підтверджується і отриманими попередніми даними супутникових спостережень. На відміну від реаналізу CAMS, таке зростання є більш ймовірним та викликає більшу довіру до надійності інформації про приземний вміст забруднюючих речовин. Значуще зменшення NO_2 спостерігалось в Одесі (-3.1%), Ізмаїлі (-1.7%) та Харкові (-1.1%). Найінтенсивніше зростання концентрацій NO_2 зафіксовано у Вінниці (8.2%), Кременчузі (5.7%) та Херсоні (4.5%). Зростання концентрацій NO_2 у містах пов'язано, у першу чергу, зі зростанням кількості автотранспорту. Найбільш типово це зростання простежується у Вінниці, де стаціонарні пости моніторингу розташовані поблизу найбільших автошляхів міста. У містах, де спостерігається зменшення концентрацій NO_2 , тренд формується внаслідок різкої зміни показників на межі 2009–2010 рр. З того часу NO_2 мало варіював

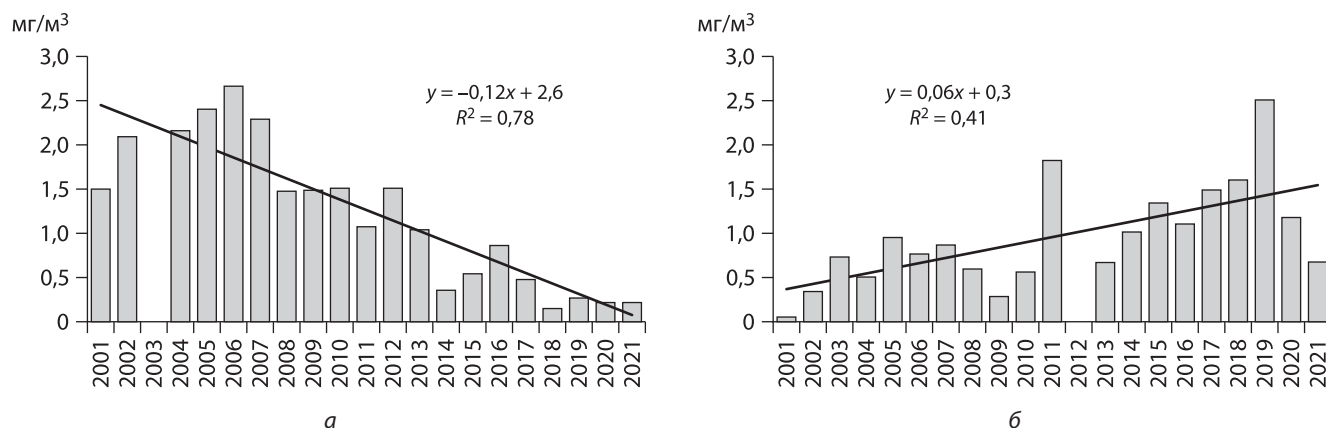


Рис. 5. Часова зміна концентрації CO за даними стаціонарних постів моніторингу у Горішніх Плавнях (а) та Україні (б) за період 2001–2021 рр. із наведеними рівняннями трендів і їх коефіцієнтами детермінації (R^2)

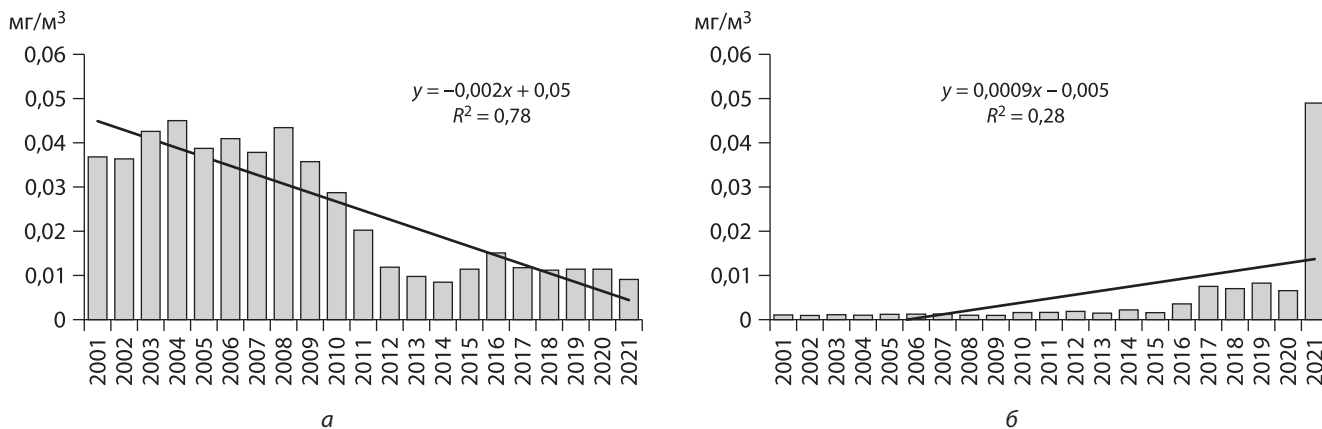


Рис. 6. Часова зміна концентрації SO_2 за даними стаціонарних постів моніторингу в Івано-Франківську (а) та Кременчузі (б) за період 2001–2021 рр. із наведеними рівняннями трендів і їх коефіцієнтів детермінації (R^2)

та до повномасштабного вторгнення перебував на одному рівні.

Кількість міст із додатними та від’ємними значущими трендами SO_2 приблизно однакова. Найінтенсивніше зменшення характерне для Івано-Франківська (–8.2%), Львова (–7.0%) та Тернополя (–6.9%). Найбільше зростання концентрацій SO_2 зафіксовано у Кременчузі (18.9%), Горішніх Плавнях (14.3%) та Києві (10.1%). Зміни концентрацій SO_2 завжди пов’язані зі зміною роботи промислових підприємств: зменшенні обсягів виробництва, зміні типу палива, встановлення нових фільтрів, тощо. У більшості міст із від’ємними трендами спостерігається різкий спад концентрацій на межі 2010-х рр. (рис. 6а), тоді як зростання концентрацій часто було стрибкоподібним (приклад Кременчук на рис. 6б).

Як бачимо тенденції приземних концентрацій забруднюючих речовин між даними CAMS та спостереженнями на постах моніторингу має ще більше неузгодженостей, ніж дані викидів, що ставить під сумнів можливості використання CAMS в межах урбанізованих районів для аналізу приземного забруднення атмосферного повітря. Необхідно зважати на неповноту наявної інформації щодо актуальних обсягів викидів, технологічних змін та встановлення нових фільтрів, а з початком повномасштабного вторгнення і стан роботи низки промислових підприємств. Як наслідок, для урбанізованих районів, наявних відкритих даних часто може бути недостатнім для розроблення ефективних планів управління якістю атмосферного повітря. Тому, у випадку окремого міста необхідно проводити додатковий аналіз із залученням представників підприємств. У той же час дані реаналізу CAMS є незамінними з точки зору аналізу за межами міст, у чистіших районах з відсутніми будь-якими спостереженнями.

3. Взаємне порівняння викидів та концентрацій різних джерел даних. Узгодження даних

викидів реаналізу CAMS та офіційних зведень є досить суперечливим для більшості міст (див. табл. 3). Узгодження CAMS із офіційними зведеннями можна використовувати (червоний колір у таблиці, що вказує на сильні кореляційні зв’язки) лише у двох містах для CO (Черкаси та Рівне); у 7 містах для NO_2 (Чернівці, Дніпро, Кам’янське, Київ, Олександрія, Тернопіль та Маріуполь до окупації у 2022 році); та у трьох містах для SO_2 (Чернівці, Сіверськодонецьк до окупації та Олександрія за умови аналізу загальної тенденції і не використанні абсолютних значень обсягу викидів). Задовільні результати (жовтий колір у таблиці, що вказує на кореляційні зв’язки в межах 0.50–0.75) виявлені ще у 12 містах для CO, 7 містах для NO_2 та 11 містах для SO_2 .

Загалом, сильні кореляційні зв’язки не завжди відображають добре узгодження даних викидів. Наприклад, якщо у більшості випадків викиди за даними CAMS та офіційних зведень співмірні (наприклад, CO на рис. 7), то часто у випадку великих міст із потужними підприємствами різниця у обсягах викидів може на порядок відрізнятись (наприклад, NO_2 у Дніпрі на рис. 8). При цьому, такі дані добре між собою корелюють через пропорційність зменшення та зростання викидів у різні роки.

Незадовільні результати (повне неузгодження) характерно для 19 міст у випадку викидів CO, 22 міст — для викидів NO_2 , та 22 міст — для SO_2 . Окремо варто зауважити прямо протилежні залежності (сильні негативні кореляційні зв’язки у табл. 3), що унеможлиблює повний сумісний аналіз даних викидів.

Приземні концентрації між даними реаналізу CAMS та спостереженнями на стаціонарних постах моніторингу мало узгоджуються між собою (див. табл. 4). Загалом набагато гірше ніж узгодження даних обсягу викидів. Проте, варто мати на увазі, що мова йде про концентрації урбанізованих районів,

Таблиця 3. Коефіцієнти кореляції між даними викидів CAMS та викидами із офіційних зведень

| Місто | CO | NO ₂ | SO ₂ |
|-------------------|-------|-----------------|-----------------|
| Біла Церква | | | |
| Бровари | | | |
| Вінниця | -0.79 | -0.42 | -0.09 |
| Горішні Плавні | 0.01 | 0.27 | 0.20 |
| Дніпро | 0.60 | 0.83 | 0.08 |
| Житомир | 0.67 | 0.28 | -0.16 |
| Запоріжжя | 0.35 | 0.52 | 0.10 |
| Івано-Франківськ | 0.49 | 0.63 | 0.69 |
| Ізмаїл | 0.63 | 0.42 | 0.60 |
| Кам'янське | 0.47 | 0.77 | 0.72 |
| Київ | 0.70 | 0.82 | -0.39 |
| Краматорськ | | | |
| Кременчук | 0.34 | -0.69 | 0.02 |
| Кривий Ріг | 0.68 | 0.68 | 0.64 |
| Кропивницький | 0.54 | -0.17 | -0.18 |
| Луганськ | 0.11 | -0.86 | -0.26 |
| Луцьк | 0.23 | 0.15 | 0.65 |
| Львів | 0.09 | 0.71 | -0.24 |
| Маріуполь | 0.13 | 0.87 | 0.67 |
| Миколаїв | 0.58 | 0.58 | 0.72 |
| Обухів | | | |
| Одеса | 0.12 | 0.39 | 0.66 |
| Олександрія | 0.36 | 0.84 | 0.75 |
| Полтава | 0.27 | 0.17 | -0.37 |
| Рівне | 0.81 | 0.50 | 0.15 |
| Рубіжне | -0.70 | 0.15 | -0.15 |
| Світловодськ | 0.02 | 0.36 | -0.11 |
| Сіверськкодонецьк | -0.06 | -0.19 | 0.89 |
| Слов'янськ | 0.67 | 0.13 | -0.33 |
| Суми | | | |
| Тернопіль | 0.00 | 0.84 | -0.01 |
| Українка | | | |
| Ужгород | 0.07 | 0.02 | -0.23 |
| Харків | 0.57 | 0.43 | 0.40 |
| Херсон | 0.09 | 0.38 | 0.60 |
| Хмельницький | 0.55 | 0.74 | 0.66 |
| Черкаси | 0.84 | -0.56 | -0.39 |
| Чернівці | 0.44 | 0.77 | 0.78 |
| Чернігів | 0.68 | -0.52 | -0.24 |

Примітка: ■ — сильні додатні кореляційні зв'язки (≥ 0.75); ■ — середні додатні кореляційні зв'язки (0.50–0.75); ■ — слабкі та/або від'ємні кореляційні зв'язки; ■ — неможливо розрахувати кореляції.

а не загального позаміського фону, де узгодження може бути набагато кращим через відсутність потужних джерел викидів.

Таблиця 4. Коефіцієнти кореляції між даними приземних концентрацій із реаналізу CAMS та стаціонарних постів спостережень

| Місто | CO | NO ₂ | SO ₂ |
|-------------------|-------|-----------------|-----------------|
| Біла Церква | 0.69 | -0.41 | -0.58 |
| Бровари | 0.34 | -0.43 | -0.48 |
| Вінниця | 0.09 | -0.15 | -0.34 |
| Горішні Плавні | -0.09 | -0.10 | -0.04 |
| Дніпро | -0.75 | -0.69 | 0.83 |
| Житомир | 0.54 | 0.04 | -0.26 |
| Запоріжжя | 0.96 | -0.57 | 0.94 |
| Івано-Франківськ | 0.26 | -0.14 | 0.61 |
| Ізмаїл | 0.75 | -0.11 | 0.24 |
| Кам'янське | | | |
| Київ | 0.88 | -0.31 | -0.69 |
| Краматорськ | | | |
| Кременчук | -0.01 | 0.09 | -0.23 |
| Кривий Ріг | -0.01 | 0.47 | 0.64 |
| Кропивницький | -0.48 | 0.27 | 0.39 |
| Луганськ | | | |
| Луцьк | -0.14 | -0.18 | -0.63 |
| Львів | 0.05 | -0.75 | 0.04 |
| Маріуполь | 0.16 | -0.25 | 0.96 |
| Миколаїв | -0.33 | -0.40 | -0.92 |
| Обухів | 0.43 | -0.74 | -0.16 |
| Одеса | 0.31 | -0.40 | -0.62 |
| Олександрія | | 0.28 | 0.32 |
| Полтава | -0.31 | -0.67 | -0.57 |
| Рівне | -0.75 | -0.17 | -0.90 |
| Рубіжне | | | |
| Світловодськ | 0.58 | 0.18 | 0.49 |
| Сіверськкодонецьк | | | |
| Слов'янськ | | | |
| Суми | 0.06 | 0.55 | 0.46 |
| Тернопіль | 0.59 | -0.25 | -0.69 |
| Українка | -0.43 | -0.54 | -0.66 |
| Ужгород | -0.80 | -0.44 | -0.89 |
| Харків | 0.40 | -0.71 | -0.46 |
| Херсон | -0.98 | 0.45 | 0.02 |
| Хмельницький | -0.80 | -0.26 | -0.32 |
| Черкаси | -0.35 | -0.02 | 0.88 |
| Чернівці | 0.23 | -0.70 | -0.65 |
| Чернігів | -0.55 | -0.51 | 0.49 |

Примітка: ■ — сильні додатні кореляційні зв'язки (≥ 0.75); ■ — середні додатні кореляційні зв'язки (0.50–0.75); ■ — слабкі та/або від'ємні кореляційні зв'язки; ■ — неможливо розрахувати кореляції.

Для CO концентрації між реаналізом та спостереженнями добре корелюють у Запоріжжі та Києві з коефіцієнтами кореляції 0.96 та 0.88 відповідно

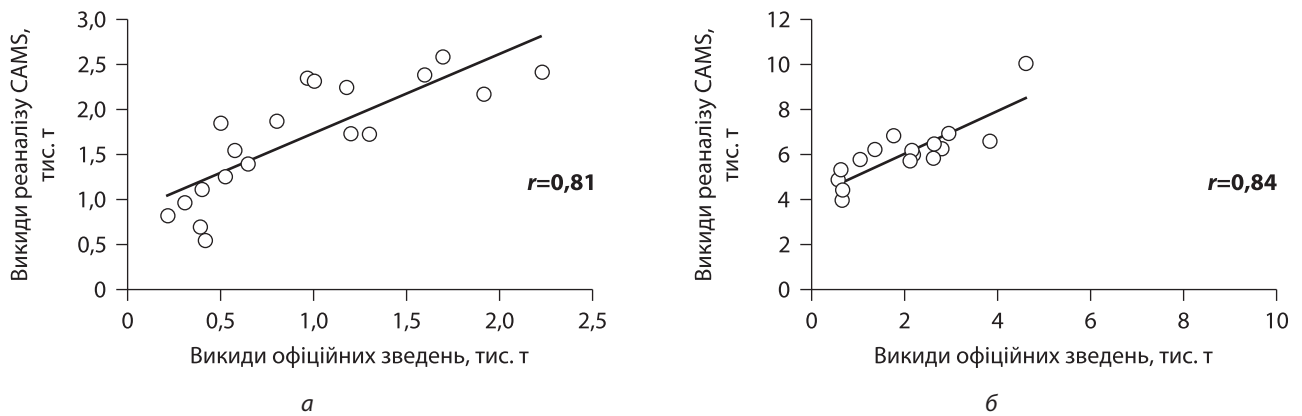


Рис. 7. Діаграма розсіювання між даними річних обсягів викидів CO за офіційними зведеннями й реаналізу CAMS на прикладі міст Рівне (а) та Черкаси (б) із наведеними коефіцієнтами кореляції

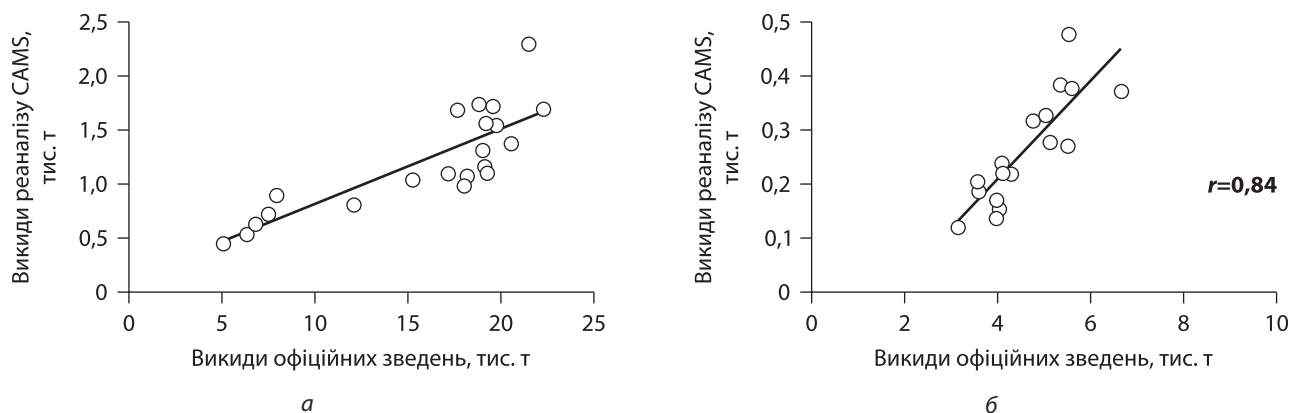


Рис. 8. Діаграма розсіювання між даними річних обсягів викидів NO₂ за офіційними зведеннями й реаналізу CAMS на прикладі міст Дніпро (а) та Тернопіль (б) із наведеними коефіцієнтами кореляції (значення на осі абсцис графіку (а) на порядок вища ніж на осі ординат)

(табл. 4). Ще у 6 містах їх можна вважати задовільними для можливості використання реаналізу CAMS, зокрема у Білій Церкві, Ізмаїлі, Світловодську, Тернополі та Житомирі. За вмістом NO₂ лише у Сумах ($r=0,55$) є узгодження концентрацій. Вміст SO₂ добре узгоджується (має сильні кореляційні зв'язки) у Маріуполі ($r=0,96$), Запоріжжі ($r=0,94$), Черкасах ($r=0,88$) та Дніпрі ($r=0,83$). У Кривому Розі та Івано-Франківську кореляції слабші, проте реаналіз CAMS може там використовуватися.

Із проведеного аналізу та співставлення даних викидів, концентрацій, їх тенденцій та взаємозв'язків визначено перелік міст, для яких актуальними є використання викидів CAMS, а для яких викидів із офіційних зведень (див. табл. 5). Таких міст усього не більше трьох на кожен їх домішок, що є вкрай малим показником надійності використання даних викидів для аналізу стану забруднення атмосферного повітря, моделювання чи встановлення особливостей тенденцій для прийняття плану тих чи інших заходів управління якістю атмосферного повітря.

Встановлені найкращі залежності предствлені на рис. 9, 10, що дійсно вказують на можливість використання у цих містах даних викидів та аналізу змін у якості атмосферного повітря на міжрічному масштабі, що є особливо важливим для розроблення заходів поліпшення стану якості атмосферного повітря.

Взаємозамінними реаналізом CAMS приземні концентрації забруднюючих речовин можуть бути лише у 7 містах для CO, 1 місті для NO₂ та 5 містах для SO₂.

- CO: Біла Церква, Житомир, Запоріжжя, Ізмаїл, Київ, Світловодськ, Тернопіль
- NO₂: Суми
- SO₂: Дніпро, Запоріжжя, Івано-Франківськ, Маріуполь (до окупації), Черкаси

На основі вказаних міст (разом із наведеними у табл. 5) можна утворити їх повний перелік, де можливо якісно проводити аналіз міжрічних змін у забрудненні атмосферного повітря із можливістю верифікації результатів.

Таблиця 5. Перелік міст, для яких встановлені значущі залежності між виміряними концентраціями забруднюючих речовин та інформацією про джерела викидів

| CO | NO2 | SO2 |
|---|--|---|
| Краще узгодження концентрацій із викидами за реаналізом CAMS | | |
| Вінниця ($r=0.79$) Івано-Франківськ ($r=0.67$) Кропивницький ($r=0.85$) Львів ($r=0.72$) | Кременчук ($r=0.62$) Одеса ($r=0.73$) | Івано-Франківськ ($r=0.77$) Одеса ($r=0.67$) |
| Краще узгодження концентрацій із викидами з офіційних зведень | | |
| Запоріжжя ($r=0.73$) Київ ($r=0.86$) Кривий Ріг ($r=0.65$) | Ужгород ($r=0.69$) | Житомир ($r=0.59$) |

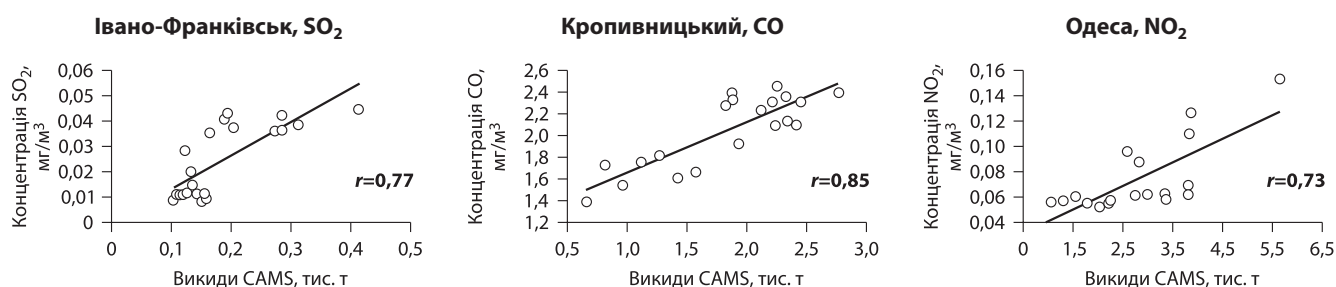


Рис. 9. Найкращі виявлені залежності між приземними концентраціями за даними спостережень та викидами із реаналізу CAMS із наведеними коефіцієнтами кореляції

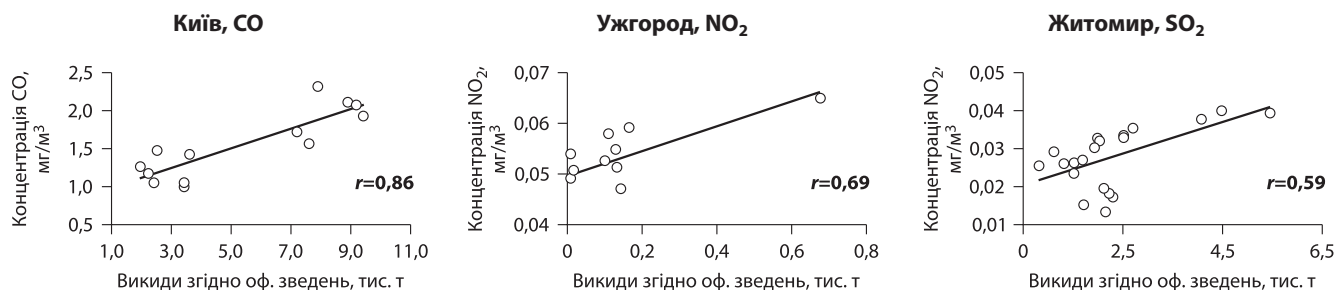


Рис. 10. Найкращі виявлені залежності між приземними концентраціями за даними спостережень та викидами із офіційних зведень із наведеними коефіцієнтами кореляції

ВИСНОВКИ

В урбанізованих районах, де типово наявна значна кількість джерел викидів забруднюючих речовин, встановлена значна неузгодженість даних щодо приземного вмісту домішок та викидів, які їх обумовлюють. У той час як у більшості міст переважають тенденції до зменшення викидів, значущих від'ємних трендів значно менше, особливо за даними концентрацій із реаналізу CAMS. Узгодження даних викидів та наявність сильних кореляційних зв'язків між CAMS та офіційними зведеннями спостерігається лише у 2 містах для CO (ще у 14 середні кореляційні зв'язки), 7 містах для NO_x (ще у 7 із середнім зв'язком) та у 3 містах для SO₂ (ще 11 міст із

середнім зв'язком). Кількість таких міст із сильними кореляціями між концентраціями забруднюючих речовин ще менша: 8 міст для CO, 1 місті для NO₂ та 4 містах для SO₂. Можливість взаємозамінного використання даних різних джерел викидів з метою аналізу наслідків для забруднення атмосферного повітря можна провадити лише 7 містах для CO, 1 місті для NO₂ та 5 містах для SO₂. Як результат, це призводить до негативних наслідків щодо можливості оцінювання міжрічних змін, якості моделювання та взаємозамінності даних, верифікації результатів оцінювання ефективності вжитих заходів щодо управління якістю атмосферного повітря, та ще цілої низки наслідків.

Офіційні зведення потребують суттєвого покращення як алгоритмів розрахунків (краще представлення пересуваних джерел та вторинного забруднення), так і точності представлення викидів промислових підприємств. Чисельні моделі хімічного транспорту, що беруть участь у формуванні реаналізу CAMS, повинні бути покращені заданими інвентаризаціями викидів, особливо в умовах воєнних дій в Україні та значного перерозподілу дже-

рел емісії, що покращить і якість представлення приземних концентрацій забруднюючих речовин. Мережа моніторингу гідрометеорологічних організацій, незважаючи на усі наявні проблеми та нестачу якісного обладнання, надає одні із найбільш аргументованих результатів міжрічної зміни якості атмосферного повітря у містах, що ще раз доводить необхідність її розширення та оновлення приладної бази.

ЛІТЕРАТУРА

- Баштаннік, М.П., Жемера, Н.С., Кіптенко, Є.М., & Козленко, Т.В. (2014). Стан забруднення атмосферного повітря над територією України. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*, 266, 70–93.
- Чугай А.В., & Сафранов Т.А. (2020). Особливості забруднення атмосферного повітря міст Північно-Західного Причорномор'я. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія"*, 52, 251–260. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-18>
- Babak, V., Zaporozhets, A., Isaienko, V., & Babikova, K. (2020). Analysis of the Air Pollution Monitoring System in Ukraine. *Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control*, 298. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_6
- Brasseur, G.P. (1997). Formulation of a Chemical Transport Model. In: Brasseur, G.P. (eds) *The Stratosphere and Its Role in the Climate System. Nato ASI Series*, vol 54. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03327-2_18
- Chastko K, & Adams M. (2019). Improving long-term air pollution estimates with incomplete data: A method-fusion approach. *MethodsX*, 6: 1489–1495. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.06.005>
- Galán-Madruga D. (2021) A methodological framework for improving air quality monitoring network layout. Applications to environment management. *J Environ Sci (China)*, 102: 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.09.009>
- Granier, C., Bessagnet, B., Bond, T., D'Angiola, A., Denier van der Gon, H., Frost, G.J., Heil, A., Kaiser, J.W., Kinne, S., Klimont, Z., Kloster, S., Lamarque, J.-F., Lioussé, C., Masui, T., Meleux, F., Mieville, A., Ohara, T., Raut, J.-C., Riahi, K., Schultz, M.G., Smith, S.J., Thompson, A., van Aardenne, J., van der Werf, G.R. & van Vuuren, D.P. (2011) Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980–2010 period. *Climatic Change*, 109, 163. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0154-1>
- Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J. J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., & Suttie, M. (2019). The CAMS reanalysis of atmospheric composition, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 3515–3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>
- Krupnick, A.J. (2008). Challenges to managing air pollution. *J Toxicol Environ Health A*, 71(1):13–23. <https://doi.org/10.1080/15287390701557404>
- Malik, A., Aggarwal, S.G., Sinha, P.R., Kondo, Y., & Ohata, S. (2024). On the biases of MERRA-2 reanalysis and ground-based measurements of black carbon aerosols over India. *Atmospheric Pollution Research* in press, 102325. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102325>
- Malytska, L., Ladstätter-Weißmayer, A., Galytska, E., & Burrows, J.P. (2024) Assessment of environmental consequences of hostilities: Tropospheric NO₂ vertical column amounts in the atmosphere over Ukraine in 2019–2022. *Atmospheric Environment*, 318, 120281. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120281>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Front. Public Health*, 8: 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Melnichenko, S. G., Bohadorova, L. M., & Okhremenko, I. V. (2023). Pollutants emissions dynamics by stationary and mobile sources of pollution within Ukraine. *Man and Environment. Issues of Neocology*, (40), 42–52. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-40-04>
- Puiu, S., Udristoiu, M.T. & Velea, L. (2022) Air Pollution Management: A Multivariate Analysis of Citizens' Perspectives and Their Willingness to Use Greener Forms of Transportation. *Int J Environ Res Public Health*, 19 (21): 14613. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114613>
- Qiu, M., Zigler, C., & Selin, N. E. (2022). Statistical and machine learning methods for evaluating trends in air quality under changing meteorological conditions. *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 10551–10566. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10551-2022>
- Rentschler, J. & Leonova, N. (2023). Global air pollution exposure and poverty. *Nat Commun*, 14, 4432. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39797-4>
- Ryu, Y-H. & Min, S-K. (2021). Long-term evaluation of atmospheric composition reanalyses from CAMS, TCR-2, and MERRA-2 over South Korea: Insights into applications, implications, and limitations. *Atmospheric Environment*, 246, 118062. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118062>
- Savenets M., Dvoretzka I., Nadtochii L., & Zhemera N. (2022). Comparison of TROPOMI NO₂, CO, HCHO, and SO₂ data against ground-level measurements in close proximity to large anthropogenic emission sources in the example of Ukraine. *Meteorological Applications*, 29 (6), e2108. <https://doi.org/10.1002/met.2108>
- Shaddick, G., Thomas, M.L., Mudu, P., Ruggeri, G., & Gummy, S. (2020). Half the world's population are exposed to increasing air pollution. *npj Clim Atmos Sci*, 3, 23. <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0124-2>
- Shahgedanova, M., & Burt, T.P. (1994). New data on air pollution in the former Soviet Union. *Global Environmental Change*, 4 (3), 201–227. [https://doi.org/10.1016/0959-3780\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0959-3780(94)90003-5)
- Smith, W.H. (1992). Air Pollution Effects on Ecosystem Processes. In: Barker, J.R., Tingey, D.T. (eds) *Air Pollution Effects on Biodiversity*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3538-6_11
- Sofiev, M., Ermakova, T., & Vankevich, R. (2012) Evaluation of the

- smoke-injection height from wild-land fires using remote-sensing data, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 1995–2006, <https://doi.org/10.5194/acp-12-1995-2012>
- Vedrenne, M., Borge, R., Lumbreras, J., Conlan, B., Rodríguez, M.E., de Andrés J. M., de la Paz, D., Pérez, J., & Narros, A. (2015) An integrated assessment of two decades of air pollution policy making in Spain: Impacts, costs and improvements. *Science of The Total Environment*, 527–528, 351–361, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.014>
- Babak, V., Zaporozhets, A., Isaienko, V., & Babikova, K. (2020). Analysis of the Air Pollution Monitoring System in Ukraine. Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, *Decision and Control*, 298. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_6
- Bashtannik, M.P., Zhemera, N.S., Kiptenko, E.M., & Kozlenko, T.V. (2014). Stan zabrudnennia atmosferogo povitria nad terytoariyu Ukrainy [The state of atmospheric air pollution over Ukraine]. *Naukovi pratsi UkrNDGMI*, 266, 70–93.
- Brasseur, G.P. (1997). Formulation of a Chemical Transport Model. In: Brasseur, G.P. (eds) *The Stratosphere and Its Role in the Climate System. Nato ASI Series, vol 54*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03327-2_18
- Chastko K, & Adams M. (2019). Improving long-term air pollution estimates with incomplete data: A method-fusion approach. *MethodsX*, 6: 1489–1495. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.06.005>
- Chugai, A.V., & Safranov, T.A. (2020). Features of air pollution the cities of the North-Western Black Sea region. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series Geology. Geography. Ecology*, 52, 251–260. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-18>
- Galán-Madruga D. (2021) A methodological framework for improving air quality monitoring network layout. Applications to environment management. *J Environ Sci (China)*, 102: 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.09.009>
- Granier, C., Bessagnet, B., Bond, T., D'Angiola, A., Denier van der Gon, H., Frost, G.J., Heil, A., Kaiser, J.W., Kinne, S., Klimont, Z., Kloster, S., Lamarque, J.-F., Lioussé, C., Masui, T., Meuleux, F., Mieville, A., Ohara, T., Raut, J.-C., Riahi, K., Schultz, M.G., Smith, S.J., Thompson, A., van Aardenne, J., van der Werf, G.R. & van Vuuren, D.P. (2011) Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980–2010 period. *Climatic Change*, 109, 163. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0154-1>
- Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J. J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., & Suttie, M. (2019). The CAMS reanalysis of atmospheric composition, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 3515–3556, <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>
- Krupnick, A.J. (2008). Challenges to managing air pollution. *J Toxicol Environ Health A*, 71 (1): 13–23. <https://doi.org/10.1080/15287390701557404>
- Malik, A., Aggarwal, S.G., Sinha, P.R., Kondo, Y., & Ohata, S. (2024). On the biases of MERRA-2 reanalysis and ground-based measurements of black carbon aerosols over India. *Atmospheric Pollution Research in press*, 102325. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102325>
- Malyska, L., Ladstätter-Weißmayer, A., Galytska, E., & Burrows, J.P. (2024) Assessment of environmental consequences of hostilities: Tropospheric NO₂ vertical column amounts in the atmosphere over Ukraine in 2019–2022. *Atmospheric Environment*, 318, 120281. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120281>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Front. Public Health*, 8: 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Melnychenko, S. G., Bohadorova, L. M., & Okhremenko, I. V. (2023). Pollutants emissions dynamics by stationary and mobile sources of pollution within Ukraine. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (40), 42–52. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-40-04>
- Puiu, S., Udriștioiu, M.T. & Velea, L. (2022) Air Pollution Management: A Multivariate Analysis of Citizens' Perspectives and Their Willingness to Use Greener Forms of Transportation. *Int J Environ Res Public Health*, 19 (21): 14613. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114613>
- Qiu, M., Zigler, C., & Selin, N. E. (2022). Statistical and machine learning methods for evaluating trends in air quality under changing meteorological conditions. *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 10551–10566, <https://doi.org/10.5194/acp-22-10551-2022>
- Rentschler, J. & Leonova, N. (2023). Global air pollution exposure and poverty. *Nat Commun*, 14, 4432. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39797-4>
- Ryu, Y.-H. & Min, S.-K. (2021). Long-term evaluation of atmospheric composition reanalyses from CAMS, TCR-2, and MERRA-2 over South Korea: Insights into applications, implications, and limitations. *Atmospheric Environment*, 246, 118062. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118062>
- Savenets M., Dvoretzka I., Nadtochii L., & Zhemera N. (2022). Comparison of TROPOMI NO₂, CO, HCHO, and SO₂ data against ground-level measurements in close proximity to large anthropogenic emission sources in the example of Ukraine. *Meteorological Applications*, 29 (6), e2108. <https://doi.org/10.1002/met.2108>
- Shaddick, G., Thomas, M.L., Mudu, P., Ruggeri, G., & Gumy, S. (2020). Half the world's population are exposed to increasing air pollution. *npj Clim Atmos Sci*, 3, 23. <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0124-2>
- Shahgedanova, M., & Burt, T.P. (1994). New data on air pollution in the former Soviet Union. *Global Environmental Change*, 4 (3), 201–227. [https://doi.org/10.1016/0959-3780\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0959-3780(94)90003-5)
- Smith, W.H. (1992). Air Pollution Effects on Ecosystem Processes. In: Barker, J.R., Tingey, D.T. (eds) *Air Pollution Effects on Biodiversity*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3538-6_11
- Sofiev, M., Ermakova, T., & Vankevich, R. (2012) Evaluation of the smoke-injection height from wild-land fires using remote-sensing data, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 1995–2006, <https://doi.org/10.5194/acp-12-1995-2012>
- Vedrenne, M., Borge, R., Lumbreras, J., Conlan, B., Rodríguez, M.E., Vilcins, D., Christofferson, R.C., Yoon, J.H., Nazli, S.N., Sly, P.D., Cormier, S.A., & Shen, G. (2024). Updates in Air Pollution: Current Research and Future Challenges. *Ann Glob Health*, 90 (1): 9. <https://doi.org/10.5334/aogh.4363>
- Yatsenko Y., Shevchenko O., & Snizhko S. (2018). Assessment of air pollution level of nitrogen dioxide and trends of it changes in the cities of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 3 (82), 87–95. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.82.11>

REFERENCES

de Andrés J. M., de la Paz, D., Pérez, J., & Narros, A. (2015) An integrated assessment of two decades of air pollution policy making in Spain: Impacts, costs and improvements. *Science of The Total Environment*, 527–528, 351–361, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.014>

Vilcins, D., Christofferson, R.C., Yoon, J.H., Nazli, S.N., Sly, P.D., Cormier, S.A., & Shen, G. (2024). Updates in Air Pollution:

Current Research and Future Challenges. *Ann Glob Health*, 90 (1): 9. <https://doi.org/10.5334/aogh.4363>

Yatsenko Y., Shevchenko O., & Snizhko S. (2018). Assessment of air pollution level of nitrogen dioxide and trends of its changes in the cities of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 3 (82), 87–95. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.82.11>

Mykhailo Savenets

ORCID: 0000-0001-9429-6209
savenets@uhmi.org.ua

Liudmyla Nadtochii

ORCID: 0000-0003-3038-5960
onoslyuda@uhmi.org.ua

Tetiana Kozlenko

kozlenkot@ukr.net

Kateryna Komisar

enkomisar@ukr.net

Antonina Umanets

ORCID: 0009-0008-4867-4430
umanets@uhmi.org.ua

Natalia Zhemera

zemeralda@ukr.net

Ukrainian Hydrometeorological Institute
of the State Emergency Service of Ukraine
and the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

REGARDING THE DATA INCONSISTENCY FROM DIFFERENT DATA SOURCES ON EMISSIONS AND GROUND-LEVEL POLLUTANTS' CONCENTRATIONS IN THE ATMOSPHERIC AIR OVER UKRAINE

The development of action plans and strategies to reduce atmospheric air pollution requires the use of emissions and

concentration data over extended periods. At such scales, the role of uncertainties increases, potentially leading to the development of ineffective measures. This article presents a study of the consistency of data from various sources, including official emissions inventories, modeled emissions data from the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), pollutant concentration data measured at stationary monitoring stations of hydrometeorological organizations, and ground-level content data from CAMS reanalysis for carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), and sulfur dioxide (SO₂). The research revealed significant inconsistencies among different datasets, often reflecting entirely different interannual variability and trends. While emissions predominantly show a declining trend, concentrations in most cities continue to rise based on observational data and often show no significant changes according to reanalysis data. Notably, agreement between emissions data from different sources was found in only 12 cases across city-pollutant pairs. Consistency in pollutant concentration data was identified in only 3 cities for CO and 4 cities for SO₂. The differences in emission volumes, even where high correlations exist, can vary by an order of magnitude for certain cities. The article provides a list of cities for each of the studied pollutants where consistency between different data sources is observed, identifying cases where the data can be complementary or interchangeable. The study emphasized that this inconsistency has negative implications for the ability to assess interannual changes, the quality of modeling and data interchangeability, the verification of evaluation results regarding the effectiveness of air quality management measures, and a wide range of other consequences.

Keywords: atmospheric air, pollution, emissions, concentrations, reanalysis, observations.



С.В. Краковська^{1*}ORCID: 0000-0001-9972-0937
krasvit@ua.fm,**Т.М. Шпиталь¹**ORCID: 0009-0001-7731-4521
tetianashpytal@gmail.com,**А.Ю. Чигарева^{1,2}**ORCID: 0000-0003-0195-751X
achyhareva@gmail.com,**С.В. Савчук¹**ORCID: 0009-0007-7861-9419
svetlanasvs120676@gmail.com,**Л.Ю. Криштоп^{1,3}**ORCID: 0009-0003-8863-9422
lidia.kryshstop@gmail.com

КЛІМАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМІЧНИХ ПЕРІОДІВ В УКРАЇНІ ДО КІНЦЯ ХХІ СТ. Частина II: ВЕГЕТАЦІЙНИЙ ПЕРІОД

У статті представлено результати дослідження термічних періодів в Україні, а саме його друга частина, яка стосується тривалості та дат початку і закінчення вегетаційного періоду, що визначається за стійким переходом середньої за добу температури повітря через 5°C. Кліматичні характеристики вегетаційного періоду визначають початок і закінчення сільськогосподарських робіт, а також низки інших заходів, які проводяться, наприклад, у лісовому та інших господарствах. Методи визначення кліматичних характеристик у даному дослідженні були аналогічними тим, що використовувалися у першій частині, де проаналізовані зміни у теплий період (Краковська та ін., 2023, <http://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.035>). Значення кліматичних характеристик вегетаційного періоду для кліматологічної норми 1961-1990 і базового періоду 1991-2010 розраховувалися за даними європейської бази даних E-OBS, а проєкції змін відносно базового і значення у майбутні три періоди (2021-2040, 2041-2060 і 2081-2100) — за добовими даними 34 регіональних кліматичних моделей (PKM) міжнародної ініціативи для Європи Euro CORDEX за сценаріями RCP 4.5 і RCP 8.5. Для розрахунків використовували функцію `esa_gsl` пакетного програмного продукту CDO (Climate Data Operator) для визначення дат стійкого переходу температури через 5°C. Для корекції різниць масок у E-OBS і ансамблю PKM через різницю кількості точок сітки переважно прибережної лінії використано засоби геоінформаційної системи QGIS 3.28, за допомогою якої також відбувалося картографування для візуалізації та аналізу результатів із подальшим представленням у вигляді карт в електронному атласі за допомогою JavaScript-бібліотеки Leaflet. Встановлено, що тривалість вегетаційного періоду зростає на всій території країни до кінця століття. Ці зміни очікуються більш однорідними, ніж зміни тривалості теплого періоду. Тривалість вегетаційного сезону, яка на початку ХХІ століття була характерна лише для південного узбережжя Чорного моря та Кримського півострова, у кінці століття за реалізації сценарію високих концентрацій RCP 8.5 може бути характерною і на крайньому північному сході країни та в Українських Карпатах. Очевидно, що це значно змінить і потребуватиме швидкої адаптації екосистем і зміни практик ведення лісівництва та агропромисловості. Представлені результати можуть бути використані в розробці секторальних, національної, обласних і муніципальних стратегій з адаптації до зміни клімату.

Ключові слова: термічний режим, зміна клімату, репрезентативні шляхи концентрацій, проєкції кліматичних характеристик, дата стійкого переходу температури повітря, Euro CORDEX.

ВСТУП

Дослідження глобального клімату останніх десятиліть підтвердили, що його зміна пов'язана з інтенсифікацією антропогенної діяльності. Викиди промисловості, транспорту та інших секторів економіки спричиняють зміну хімічного складу та збільшення концентрації парникових газів у атмосфері з відповідним накопиченням тепла, яке підсилюється через значну зміну землекористування із зниженням поглинальної здатності не тільки суходолу,

але й океанів (Summary..., 2022a, 2022b, Technical..., 2023). Підвищення глобальної температури безпосередньо впливає на регіональний клімат з відповідною зміною термічного режиму, зокрема в Україні (Mean Projections..., 2021), на який також впливає зміна головних кліматоутворюючих чинників — сонячної радіації, яка зростає в країні синхронно з температурою повітря з 80-х рр. ХХ ст. (Рибченко та ін., 2023), а також циркуляція атмосфери (Мартазінова та ін., 2023), яка впливає на характер хмарності

(Заболотська та ін., 2021). В Україні наслідки зміни клімату посиленні військовою агресією росії з 2014 року, а отже перерозподілом ресурсів на реінтеграцію та відбудову інфраструктури, продовольчі програми тощо (КМУ, 2019, 2022).

Зміни у просторовому та сезонному розподілі температури повітря позначаються на різних аспектах життєдіяльності людства, особливо пов'язаних із кліматовразливими галузями економіки. Серед них передусім аграрний сектор, який визначає глобальну продовольчу безпеку, а також управління екосистемами, лісове, водне, комунальне та транспортне господарства, будівництво, енергетику, охорону здоров'я тощо. За нещодавно проведеними оцінками ці галузі в Україні вже перебувають і надалі перебуватимуть під значним кліматичним впливом принаймні до кінця ХХІ ст. (Швиденко та ін., 2018; Краковська та ін. 2016а, 2016b; Кліматичні ризики..., 2018; Шевченко та ін., 2019; КМУ, 2019).

Економічні ризики для аграрного сектору в Україні, де близько 70% території країни знаходяться під сільськогосподарськими угіддями (КМУ, 2022), пов'язані передусім з термічними періодами та їхніми часовими варіаціями, що впливають на регіональні умови вирощування культур (Lalic et al., 2018). Термічні періоди характеризуються спеціалізованими метеорологічними показниками, які значно залежать від географічного розташування. Безпосередньо для сільського господарства критичними і визначальними є дати початку, закінчення та тривалість періодів із середньою за добу температурою повітря (Тсер, °C) вище визначених порогових значень (Growing season length), а також суми ефективних температур за ці періоди, які визначають теплові ресурси території, показники морозності і континентальності клімату тощо (Клімат України, 2003; Польовий та ін., 2004; Дати переходу..., 2010; Атлас "Агрокліматичні...", 2016; Краковська та ін., 2023; Мартазінова та ін, 2023).

Важливе значення для сільськогосподарського виробництва має вегетаційний період — проміжок часу обмежений датами стійкого переходу середньої за добу температури повітря навесні та восени через 5°C. За таких температурних умов починається зростання та розвиток (вегетація) холодостійких і, особливо, теплолюбних рослин, коли активізуються фізіологічні процеси (фотосинтез, дихання та ріст). Для однорічників це час від посадки (проростання насіння), а багаторічників — від сходів або набухання бруньок до дозрівання (збирання врожаю); для дерев — час активної життєдіяльності від початку сокоруху та розпускання бруньок до обпадання листя (Ботанико-фармакогностический..., 1990). Тривалість періоду вегетації безпосередньо

впливає на продуктивність рослин, врожайність і біорізноманіття. Залежно від регіону його можливі просторово-часові зсуви мають позитивні (Північна та Центральна Європа) та негативні (Південна та Східна Європа) наслідки, особливо для аграрного сектору. Поріг у 5°C важливий для рослин помірною клімату оскільки визначає біорізноманіття, яке потребує охорони середовища теплолюбних видів і адаптації в управлінні лісовими ресурсами (росту дерев, відновлення лісів і складу видів), динаміки екосистем через зв'язки між рослинами, трав'янистими тваринами та запилювачами, які чутливі до сезонних змін, контролю розповсюдження інвазійних видів рослин і комах. Для основних сільськогосподарських культур (пшениця, ячмінь, овес) дата початку вегетаційного періоду і його тривалість визначають проростання, ріст та розвиток, цвітіння і плодоношення. Тому ці показники є вкрай важливою інформацією при плануванні стійких методів ведення агробізнесу, а саме строків посіву та збору врожаю, селекції та диверсифікації культур, заміни сортів і типів культур, зміні агротехнологій, управління водними ресурсами та поливу, боротьби зі шкідниками (Лозовіцький, 2010; Дем'янюк та ін., 2016); Балабух, 2017; Яровий та ін., 2017; Predicting the Distribution..., 2021; Садовська та ін., 2023).

Враховуючи важливість прогнозування вегетаційного періоду, його дослідження мають досить довгу історію (Клімат України, 2003; Польовий та ін., 2004; Дати переходу..., 2010; Атлас "Агрокліматичні...", 2016). Методи визначення дат переходу температури через певні межі можуть бути різними в залежності від поставлених завдань (Скриник & Скриник, 2006; Сніжко та ін., 2007; Заблоцька & Скриник, 2009; Мартазінова та ін., 2023). У даному дослідженні використовували кліматологічний метод, коли спочатку усереднювали за кліматичний період річний хід середньої за добу температури повітря, а потім визначали стійкий перехід, коли 6 днів поспіль температура була вищою (нижчою) навесні (восени), ніж порогове значення.

В останні роки увага науковців прикута переважно до аналізу поточних і прогнозованих змін температури повітря і низці супутніх питань, включно зі змінами термічних періодів у майбутньому за сценаріями (Сніжко та ін., 2007; Evaluating Vegetation..., 2007; Заблоцька & Скриник, 2009; Польовий & Божко, 2015; Хохлов & Єрмоленко, 2015; Польовий та ін., 2017; Краковська & Шпиталь, 2018). Так у роботі (Польовий та ін., 2017) порівнювалися зміни за сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5, отриманими в моделях сімейства CMIP5, але різкіші зміни очікуються саме для вегетаційного періоду за сценаріями A1B та A2 попереднього глобального експерименту CMIP3.

Також у попередніх дослідженнях авторів (Дослідження..., 2013; Краковська & Шпиталь, 2018) встановлено, що до середини ХХІ ст. початок і закінчення вегетаційного періоду змістяться максимально на 9–13 днів із подовженням вегетації на 20–23 дні на півдні згідно до сценарію А1В на основі ансамблю шести регіональних кліматичних моделей (ПКМ). Але на відміну від попередніх оцінок, для території України наразі доступні дані більшої кількості ПКМ з просторовим розділенням $0,1^\circ$ для сценаріїв RCP 4.5 та RCP 8.5 Міжнародної ініціативи Euro-CORDEX. Отже, метою цього дослідження був аналіз зміни характеристик вегетаційного періоду в Україні за оновленими сценаріями у майбутні періоди 2021–2040, 2041–2060 і 2081–2100 відносно базового періоду 1991–2010, а також фактичних змін у базовий період порівняно з періодом стандартної кліматологічної норми 1961–1990.

ПОЧАТКОВІ ДАНІ ТА МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ

Методика, алгоритм, підходи до візуалізації отриманих результатів були аналогічні викладеним у статті авторів щодо теплого періоду в цьому циклі публікацій результатів дослідження термічних періодів й їхніх проєкцій для України до кінця ХХІ ст. (Краковська та ін., 2023). А саме, в якості фактичних використано дані про середню за добу температуру повітря Європейської бази E-OBS 20.0e (Cornes et al., 2018). Для оцінок проєкцій до 2100 року використовували дані про середню за добу температуру повітря 34 ПКМ за сценаріями репрезентативних помірних (RCP 4.5) і високих (RCP 8.5) концентрацій парникових газів Міжнародного Координованого експерименту з масштабування для Європи Euro-CORDEX (Jacob et al., 2014) у межах проєкту CMIP5 (Taylor et al., 2012; WCRP, 2011). Просторове розділення даних бази E-OBS і ансамблю обраних моделей є однаковим із кроком горизонтальної сітки близько 12×12 км, що складає більше 7300 вузлів у межах України.

Обробка даних включала методи математичної статистики, а саме кватильного мапування для корекції відхилень на стадії підготовки даних провайдерами (Breakout group..., 2015). Адитивний (або дельта) метод зсуву використовувався для подальшої корекції похибок ("bias-adjustment") розрахованих прогностичних значень за ансамблем ПКМ із застосуванням базових значень, отриманих аналогічними розрахунками за даними E-OBS (Шедеменко та ін., 2012; Паламарчук & Краковська, 2018; Розроблення..., 2021, 2023). Для розрахунків використовували функцію `esa_gsl` пакетного програмного продукту CDO (Climate Data Operator) для

визначення дат стійкого (шість і більше діб поспіль) переходу температури через визначені порогові межі, у цьому дослідженні 5°C (Schulzweida, 2019). Для корекції різниць масок в E-OBS і ансамблю ПКМ через різницю кількості точок сітки переважно прибережної лінії використано засоби геоінформаційної системи QGIS 3.28, за допомогою якої також відбувалося картографування для візуалізації та аналізу результатів із подальшим представленням у вигляді карт в електронному атласі за допомогою JavaScript-бібліотеки Leaflet (Краковська та ін., 2023).

Розрахунки показників проводилися для кожної ПКМ окремо, після чого визначалися їхні зміни у майбутні періоди відносно базового, і лише потім усереднювали значення змін за ансамблем 34 ПКМ в окремі 20-річчя ХХІ ст. (Паламарчук & Краковська, 2018; Розроблення..., 2021, 2023; Краковська та ін., 2023). Ці зміни додавалися до значень у базовий період і таким чином отримували дати початку, закінчення та тривалості вегетаційного періоду в Україні й їхні зміни за окремі обрані майбутні 20-річчя відносно базового 1991–2010. Вибір 20-річних періодів відповідає методичним підходам останнього Шостого звіту Міжурядової групи експертів зі зміни клімату МГЕЗК (Summary..., 2022a, 2022b, Technical..., 2023; Краковська та ін., 2023). У зв'язку із зменшенням кількості метеорологічних станцій України після анексії АР Крим і частини східних областей після 2014 року і у відповідності до рекомендацій ВМО, обраний базовий період закінчувався найближчим "нульовим" роком, де були дані по всій території країни, тобто 2010 (WMO, 2017; Краковська та ін., 2023).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНІЙ АНАЛІЗ

Тривалість вегетаційного періоду. У кліматичний період **1961–1990** усереднене значення тривалості вегетаційного періоду становило 219 днів із мінімумом 162 дні у Карпатах і максимумом у 284 дні в АР Крим (рис. 1). Найкоротший вегетаційний сезон (162–180 днів) спостерігався вздовж високогірних хребтів Карпатських гір, 180–200 — у південно-східній частині Карпат та на крайньому північному сході країни (на півночі та у східних районах Сумської області, в осередку на північному сході Чернігівської та локально на півночі Харківської). На решті території Карпат та переважній частині України від сходу до західних областей — тривалість вегетаційного періоду становила 200–220 днів. У південній частині країни (Миколаївська, Херсонська, західна та південні частини Запорізької, узбережжя Донецької, північна частина Одеської, південні райони Вінницької, Кіровоградської та Дніпропет-

ТРИВАЛІСТЬ ВЕГЕТАЦІЙНОГО ПЕРІОДУ GROWING SEASON LENGTH

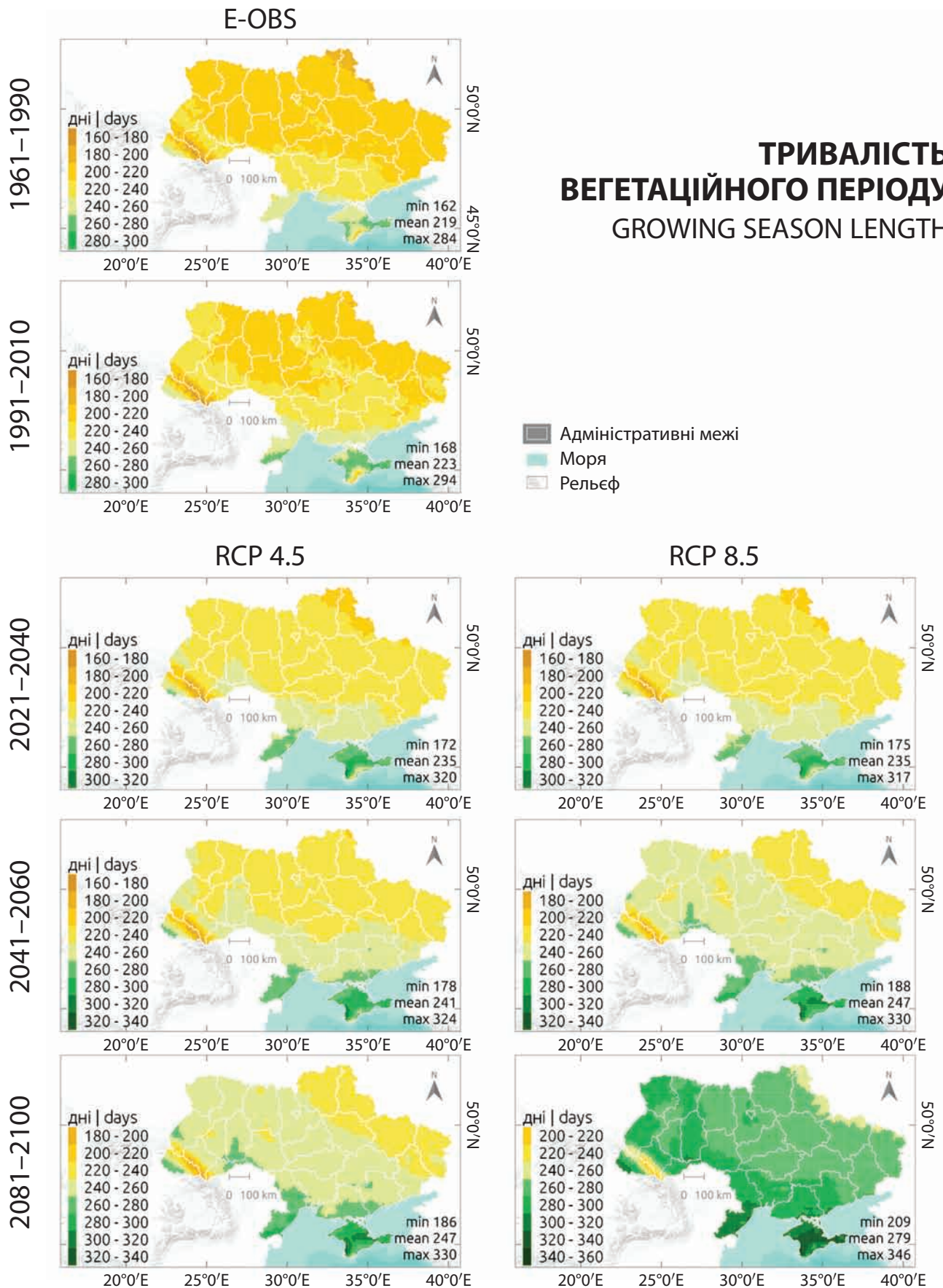


Рис. 1. Тривалість вегетаційного періоду за даними E-OBS, сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5 у вказані періоди XX–XXI ст.

ровської областей) та у південно-західній (центральні райони Львівської, північно-східна частина Івано-Франківської, значні території Чернівецької, південні райони Тернопільської та Хмельницької областей, Вулканічний хребет), а також вздовж Дніпровських водосховищ у Київській, Черкаській та Дніпропетровській областях вегетаційний сезон тривав 220–240 днів. На Кримському півострові виділяється досить контрастний характер тривалості вегетаційного періоду: на південному заході та у східних районах — 260–280 днів, в окремих локаціях Керченського півострова найдовше — 280–284, у Кримських горах 200–220, 220–240 (північні схили). Решта території АР Крим, а також південна частина Одеської області та південні райони Херсонської — 240–260 днів.

У період **1991–2010** порівняно із минулим **1961–1990** вегетаційний сезон в Україні зріс у Карпатах на 6 днів і тривав 168 днів, а в районі Керченського півострову — на 10 днів до максимальних 294 днів. У середньому в країні зміни склали 4 дні і вегетаційний сезон тривав 223 дні (рис. 1). Найкоротший вегетаційний період у 168–180 днів тривав вздовж високогірних хребтів, а 180–200 днів — здебільшого у південно-східній частині Карпат та в локації на північному сході Сумської області. На решті території Карпатських гір та на значній частині України від сходу до західних областей вегетаційний сезон тривав 200–220 днів, але порівняно з періодом 1961–1990, ці площі значно скоротились за рахунок відчутного збільшення територій з більшою тривалістю у 220–240 днів. Такий процес поширився у всі регіони країни: Дніпропетровську, Запорізьку, Миколаївську області, північні частини Одеської та Херсонської, південні райони Донецької, Кіровоградської і Полтавської, центральні Луганської і Київської, схід Черкаської, південні частини Вінницької, Хмельницької та Тернопільської, Волинську область, а також Львівську, Івано-Франківську та Чернівецьку (за виключенням гірських частин) та вздовж Вулканічного і Полонинського хребтів. Тривалість вегетаційного сезону у 240–260 днів отримана у Закарпатті, південній частині Одеської області (крім крайнього півдня), вздовж узбережжя Миколаївської, у південній частині Херсонської, в осередку на південному заході та вздовж узбережжя Запорізької області. В АР Крим тривалість вегетаційного сезону була досить різною: 200–220 днів на Головному пасмі, 220–240 на Внутрішньому, 240–260 на Зовнішньому пасмі та північному заході півострова, 280–294 у локаціях на заході та півдні Керченського півострова. На решті території АР Крим та в осередку на крайньому півдні Одеської області — 260–280 днів.

За сценарієм **RCP 4.5**, у **2021–2040** роках найкоротший вегетаційний сезон очікується у високогір'ї південно-східних Українських Карпат — 180–200 днів (на окремих вершинах 172–180) (рис. 1). На решті території Карпат, у північних та східних районах Сумської області, північному сході Чернігівської та осередку на півночі Харківської — 200–220 днів. На значній території України вегетаційний сезон триватиме 220–240 днів. Тривалість у 240–260 днів очікується на півдні та заході країни: у західній частині Запорізької області, на Херсонщині і Миколаївщині (крім її північних районів), північній частині Одещини, на півдні Хмельницької, південному заході Вінницької, сході Чернівецької, південному сході Тернопільської, у центрі Львівської областей та Закарпатті. У південній частині Одеської області очікується 260–280, а в локаціях на узбережжі до 300 днів. В АР Крим тривалість вегетаційного сезону буде від 240–260 днів на Головному та Внутрішньому пасмі, 260–280 — на Зовнішньому пасмі, Керченському півострові та у північній частині Кримського півострова, 280–300 — у центральній частині, а в локації на південному заході — до 300–320 днів.

Сценарій **RCP 8.5** для періоду **2021–2040** практично аналогічний сценарію RCP 4.5 для цього періоду навіть за середнім значенням 235 днів, але меншим розкидом значень: від 175 до 317 днів (рис. 1).

У період **2041–2060** за сценарієм **RCP 4.5** у високогір'ї південно-східних Карпат вегетаційний сезон триватиме так само 180–200 днів (на поодиноких вершинах 178–180), на решті території гірського масиву та в осередку на півночі Сумської області — 200–220 (рис. 1). На значній території України від сходу до західних областей вегетаційний сезон триватиме 220–240 днів. Як і раніше 240–260 днів очікується здебільшого у Південному та Західному регіонах: Запорізькій та Херсонській (крім їх південних районів), Миколаївській областях, південних частинах Донецької, Дніпропетровської та Вінницької областей, північній частині Одеської, сході Тернопільської, заході Волинської, центрі Івано-Франківської, переважно у Чернівецькій, Хмельницькій та Львівській областях, вздовж Полонинського та Вулканічного хребтів, а також вздовж Дніпровських водосховищ та в локації на сході Луганської області. Тривалість у 260–280 днів отримано на півдні Одеської області (в окремих локаціях на узбережжі до 280–300), у південно-східних районах та по узбережжю Херсонської, в осередку на південному заході Запорізької областей. Вегетаційний сезон в АР Крим триватиме переважно 280–300 днів, в осередку на південному заході — 300–320 (в районі Херсонесу до 324), на північному заході — 260–280, у Кримських горах — 240–260 днів.

Сценарій **RCP 8.5** для **2041–2060** років прогнозує найкоротшу тривалість вегетаційного сезону так само у південно-східній частині Українських Карпат — 200–220 днів, 180–200 днів у високогір'ях (рис. 1). Вегетаційний сезон у 220–240 днів очікується на сході та північному сході України: в Луганській (крім центральних районів), північному сході Донецької областей, у Харківській, Сумській, Чернігівській (крім південного заходу), значній площі Полтавської, в осередку на півночі Кіровоградської, а також у північних та південних районах Житомирської, на півночі Вінницької, у суміжних районах Львівської та Тернопільської областей, на решті території Карпат. На значній площі України вегетаційний сезон триватиме 240–260 днів. Збільшення тривалості до 260–280 днів прогнозується на заході та півдні країни: у Закарпатті, локації на заході Львівської області, у південних районах Хмельницької, на сході Чернівецької, крайньому південному заході Вінницької, у південних частинах Одеської (в осередках до 280–300) та Херсонської областей, узбережжі Миколаївської, на південному заході Запорізької області, в районі Каховського водосховища. На переважній території АР Крим вегетаційний сезон вже триватиме 280–300 днів, в Кримських горах та Тарханкутському півострові — 260–280, на південному заході та у центральних районах — 300–320, у локації Херсонесу — 320–330 днів.

Отримана проєкція тривалості вегетаційного сезону за сценарієм **RCP 4.5** для періоду **2081–2100** практично аналогічна сценарію **RCP 8.5** для **2041–2060** навіть за середнім і максимальним значенням у 247 і 330 днів відповідно (рис. 1).

У **2081–2100** роках сценарій **RCP 8.5** передбачає найкоротший вегетаційний сезон у південно-східних Карпатах — 220–240 днів (на окремих хребтах — 209–220), 240–260 — на решті території Карпат, а також на північному сході України (північних районах Луганської та Харківської, північній та східній частинах Сумської областей) (рис. 1). Подовження сезону до 260–280 днів очікується на значній території Східного, Центрального і Північного регіонів країни, а також Західного — в ареалі суміжних територій Тернопільської, Львівської, Волинської та Рівненської областей. Тривалість вегетаційного сезону 280–300 днів прогнозується у західній та південній частині країни: у Херсонській та Миколаївській областях, західній частині та по узбережжю Запорізької, вздовж узбережжя Донецької, південних районах Дніпропетровської, північній частині Одеської, півдні Вінницької, східній частині Тернопільської, у Львівській, Івано-Франківській та Чернівецькій областях (крім їх гірських територій), на значних територіях Волинської та Рівненської

областей, на Полонинському та Вулканічному хребтах, у Хмельницькій та центральних районах Київської області. Тривалість у 300–320 днів очікується у південній частині Одеської області (в локаціях на узбережжі до 320–340), в окремих районах півдня Херсонської та Запорізької, у північно-західній частині АР Крим, у Кримських горах (на височинах 280–300), в осередку на сході Чернівецької та півдні Хмельницької областей, у Закарпатті. На значній території Кримського півострова (у східній, центральній та південно-західній частинах) за цим сценарієм вегетаційний сезон триватиме найдовше — 320–340 днів, в окремих локаціях максимально до 346 днів на рік.

Початок (день року) вегетаційного періоду.

У період **1961–1990** найпізніший початок вегетаційного сезону, на 100–110 день року, відбувався у Карпатах (на 110–120 у високогір'ї, 120–130 на окремих вершинах), а також в осередку між Донецькою і Луганською областями та на північному сході країни: у Сумській області, північних районах Харківської і Луганської областей, на північному сході Полтавської, у північній та східній частинах Чернігівської області (рис. 2). На схилах Карпат, у Кримських горах та значній території України вегетаційний сезон починався на 90–100 день. З 80–90 дня відмічався початок сезону на Полонинському хребті, центральних районах Чернівецької області, у південних частинах Одеської, Миколаївської та Херсонської областей, на півночі АР Крим, з 70–80 — на Закарпатті, в локації на півдні Одеської області, та на значній території АР Крим. Найраніше вегетаційний сезон розпочинався вздовж південного узбережжя Керченського півострова — 50–60 день, на сході та на південному заході Кримського півострова — на 60–70 день.

У **1991–2010** роках, найпізніше, на 100–110 день, починався вегетаційний сезон у Карпатах (у високогір'ях 110–120) та у східних районах Сумської області, на 90–100 — на схилах Карпат та значній території України від сходу до західних областей (рис. 2). Настання вегетаційного сезону на 80–90 день відмічалось здебільшого у Південному та Західному регіонах: у західній та південній частині Запорізької області, Херсонській (крім південних районів), Миколаївській, у північній частині Одеської, у південних районах Вінницької області, у Чернівецькій, Івано-Франківській та Львівській областях (крім їх гірських територій), Волинській, південних частинах Тернопільської та Хмельницької областей, на Полонинському хребті, а також в районах Дніпровських водосховищ. Початок на 70–80 день спостерігався в осередку на заході Львівської області, на Вулканічному хребті, у південній частині та східних районах

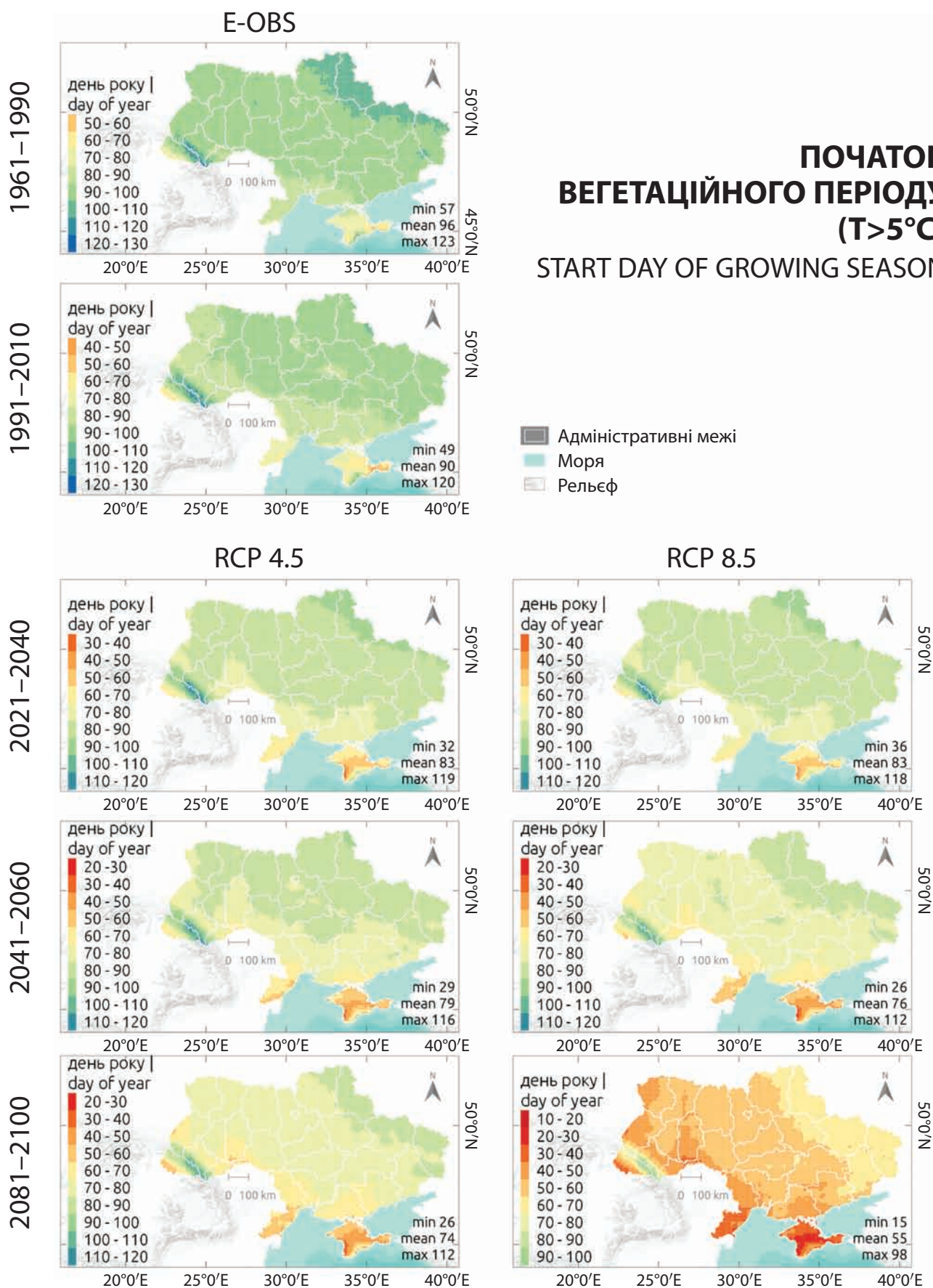


Рис. 2. Початок (день року) вегетаційного періоду за даними E-OBS, сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5 у вказані періоди XX–XXI ст.

Одеської області, південних районах Херсонської, на 60–70 день — у Закарпатті, південних локаціях Одеської області. В АР Крим відмічалось 7 градацій початку вегетаційного сезону: на 90–100 день на Головному пасмі Кримських гір (100–110 на вершинах), 80–90 — на Внутрішньому пасмі, 70–80 — на Зовнішньому пасмі та у північній частині півострова, 50–60 — на перешийку Ак-Монай (40–50 на його півдні), 60–70 — на решті території Кримського півострова.

Сценарій **RCP 4.5** у **2021–2040** роках прогнозує самий пізній початок вегетаційного сезону так само на 100–110 день у південно-східних Карпатах (у високогір'ях 110–120). На 90–100 день — на решті території Карпат та на північному сході України: у Сумській області (крім південного заходу), північному сході Чернігівської, у північних районах Харківської та Луганської областей (рис. 2). На переважній території країни початок вегетаційного сезону очікується на 80–90 день. На 70–80 день вірогідний початок даного сезону у Західному та Південному регіонах: у Херсонській області, західній частині Запорізької, південній частині Миколаївської, у північній частині Одеської, у південно-західних районах Вінницької областей, у Чернівецькій (крім заходу), південній частині Хмельницької, у південно-східних районах Тернопільської, на заході Львівської та Волинської областей, у Кримських горах. У Закарпатті, південній частині Одеської області, на півночі АР Крим та на Керченському півострові вегетаційний сезон буде починатись на 60–70 день, у центральних районах АР Крим та вздовж узбережжя Керченського півострова — на 50–60, в локації на південному заході Кримського півострова — на 40–50 та 30–40 день.

Сценарій **RCP 8.5** для **2021–2040** років практично аналогічний сценарію **RCP 4.5** для цього періоду (рис. 2).

За сценарієм **RCP 4.5**, на середину XXI ст. у **2041–2060** роках початок вегетаційного сезону на 80–90 день очікується у всіх регіонах країни, крім Південного (рис. 2). Пізніший початок прогнозується у південно-східних Карпатах — на 100–110 (у високогір'ях 110–120) та на решті території Карпатських гір і у північних районах Сумської області — на 90–100 день. На переважній території південної та західної частин країни вегетаційний сезон почнеться на 70–80 день: у південних частинах Донецької та Вінницької областей, у Дніпропетровській (крім північних районів), Запорізькій, Миколаївській та Хмельницькій областях, Херсонській (крім півдня), на півночі Одеської, заході Кіровоградської, у східній частині Тернопільської, значних площах Чернівецької, Івано-Франківської та Львівської областей, на заході Волинської області, вздовж Вулканічного

хребта, в осередках Луганської та Київської областей, в районах Дніпровських водосховищ. У Закарпаття, суміжні райони Чернівецької та Хмельницької областей, південну частину Одеської області, південь Херсонської, південний захід Запорізької, північний захід АР Крим та Кримські гори вегетаційний сезон прийде на 60–70 день. У локаціях на південному узбережжі Одеської області та переважній території АР Крим — на 50–60 день, на південний захід півострова, центральні райони, узбережжя Керченського півострова — на 40–50, у локації на південно-західному узбережжі — на 30–40 та 20–30 день.

Сценарій **RCP 8.5** для **2041–2060** років передбачає самий пізній початок вегетаційного сезону у південно-східних Українських Карпатах — на 100–110 день (110–120 на окремих вершинах), на решті високогірних територій — на 90–100 (рис. 2). По схилах Карпатських гір та на північному сході країни (Сумська область, значні території Чернігівської, Харківської, Полтавської, північна частина та на південні райони Луганської), а також в ареалах між Житомирською та Вінницькою областями і на півночі Кіровоградської початок вегетаційного сезону очікується у середньому на 80–90 день. На значній території України, що охопить всі регіони, вегетація почнеться раніше — на 70–80 день. На 60–70 день прогнозується початок вегетаційного періоду у південній та південно-західній частинах України: на значній території Херсонської області (крім північних та західних районів), у південних ареалах Запорізької, Миколаївської та Вінницької областей, центральних районах Одеської області, у Чернівецькій (крім гірських районів), у південній частині Хмельницької, на південному сході Тернопільської, у Закарпатті та Передкарпатті Львівської області, а також вздовж Головного пасма Кримських гір. У південній частині Одеської області, у північній частині АР Крим, на значній території Керченського півострова, вздовж Внутрішнього пасма Кримських гір та в осередку на півдні Закарпатської області вегетація буде починатись на 50–60 день. У центральній частині Кримського півострова та у 2-х локаціях на узбережжі Одеської області початок вегетаційного періоду очікується на 40–50 день, а у південно-західному осередку Криму та в локаціях на півдні Арабатської стрілки та Керченського півострова, на крайньому заході Тарханкутського півострова — на 30–40 та, навіть раніше — на 20–30 день.

Згідно сценарію **RCP 4.5**, у **2081–2100** роках самий пізній початок вегетаційного сезону прогнозується у південно-східній частині Карпат: на 100–110 день у високогірній частині, на 110–120 на окремих вершинах, на 90–100 на решті території (рис. 2).

У північно-західних Карпатах – на 80–90 день, вздовж схилів — на 70–80. Прихід вегетаційного періоду на 80–90 день також очікується на північному сході та сході України: у Сумській області, Луганській (крім центральних районів), північній частині Харківської, на північному сході Чернігівської та Полтавської областей. Початок вегетаційного сезону на 60–70 день передбачається, переважно, на півдні та південному заході країни: у Херсонській, північній частині Одеської області, в західних частинах Запорізької та Миколаївської, в районах на крайньому півдні Вінницької, у Чернівецькій (без західних гірських територій), південній частині Хмельницької, на південному сході Тернопільської, окремих районах на сході Івано-Франківської, у західній частині Львівської області, вздовж Вулканічного хребта Карпатських гір. Початок вегетаційного періоду на 50–60, 40–50, 30–40 та 20–30 дні аналогічний сценарію **RCP 8.5** для **2041–2060**. На решті території України, що охопить всі регіони, сезон вегетації почнеться на 70–80 день.

За сценарієм **RCP 8.5**, у **2081–2100** роках самий пізній початок вегетаційного сезону прогнозується у Карпатах: у південно-східній частині — на 80–90 день (у високогір'ях на 90–100), у північно-західній — на 70–80, вздовж схилів — на 60–70, у передгір'ях — на 50–60 (рис. 2). На 60–70 день очікується старт вегетації на сході та північному сході України: у Сумській, Харківській, Луганській областях, Донецькій (крім районів на крайньому півдні), у східних частинах Чернігівської та Полтавської, в осередку на сході Запорізької областей. Початок вегетаційного періоду на 40–50 день буде відмічатись, переважно, на півдні та заході країни: у північній частині Одеської області, районах на заході Запорізької, значній території Херсонської (крім півночі та південного заходу), південному заході Вінницької, у південній частині та центральних районах Хмельницької, південному сході Тернопільської, центральній частині Чернівецької, північно-східних районах Івано-Франківської, західних частинах Львівської та Волинської областей, вздовж Вулканічного хребта Карпат та Головного пасма Кримських гір. На 30–40 день очікується початок вегетації у Закарпатті, в осередку, що охопить схід Чернівецької та крайні південні райони Хмельницької областей, у південній частині Одеської області (крім районів на узбережжі), у північній частині АР Крим, на Керченському півострові, по Внутрішньому пасму Кримських гір. Самий ранній початок вегетаційного періоду. На 20–30 день прогнозується у центральній та південно-західній частині АР Крим та по узбережжю Керченського півострова, а у локації Херсонесу — на 10–20.

Закінчення (день року) вегетаційного періоду.

У **1961–1990** роках на 290–300 день вегетаційний сезон закінчувався у південно-східному високогір'ї Карпат, найраніше на 285–290 день року — на вершинах, на 300–310 — на решті території гірського масиву, а також на сході та північному сході України: в Луганській і Сумській областях, північних частинах Донецької та Полтавської, у Харківській (крім південних районів), у північній та східній частинах Чернігівської (рис. 3). На 320–330 день спостерігався кінець вегетаційного сезону у Закарпатті та південній частині країни: в Одеській, Миколаївській та Херсонській областях (крім їх північних районів), у південній частині Запорізької та у Кримських горах (на Головному пасмі на 310–320). Закінчення на 330–340 день спостерігалось на південному сході Одеської області, на Азовському узбережжі Херсонської та на значній території АР Крим. До 340–350 дня тривав вегетаційний сезон на південному узбережжі Керченського півострова, на перешийку Ак-Монай, та в районі Херсонесу. На значній території України від сходу до заходу країни вегетаційний сезон закінчувався у середньому на 310–320 день року.

У **1991–2010** роках закінчення вегетаційного сезону на переважній території України відмічалось так само на 310–320 день (рис. 3). Раніше, на 300–310 день, фіксувалось закінчення в Карпатах (290–300 — у південно-східному високогір'ї, 285–290 день — на вершинах). А також у північній частині країни: у Сумській, значних територіях Чернігівської, Житомирської та Рівненської областей, у північних частинах Тернопільської, Хмельницької, Київської, Полтавської та Харківської, у північних районах Луганської та Вінницької областей. На 320–330 день закінчувався вегетаційний період у центральних та південно-західних районах Одеської області, південних частинах Миколаївської та Запорізької, значній території Херсонської, вздовж узбережжя Донецької, у Кримських горах (на Головному пасмі 310–320). У південній частині Одеської області, на Чорноморському узбережжі Херсонської та значній території АР Крим закінчення вегетаційного сезону відмічалось на 330–340 день, а на південному узбережжі Керченського півострова та перешийку Ак-Монай — на 340–350 день.

Згідно сценарію **RCP 4.5**, у **2021–2040** роках на значній території України закінчення вегетаційного сезону прогнозується на 310–320 день, на 290–300 — у високогір'ї південно-східних Карпат (на вершинах — 280–290), на 300–310 — на решті території гірського масиву, а також у північній і східній частині Сумської області та у північно-східному районі Чернігівської (рис. 3). На 320–330 день віро-

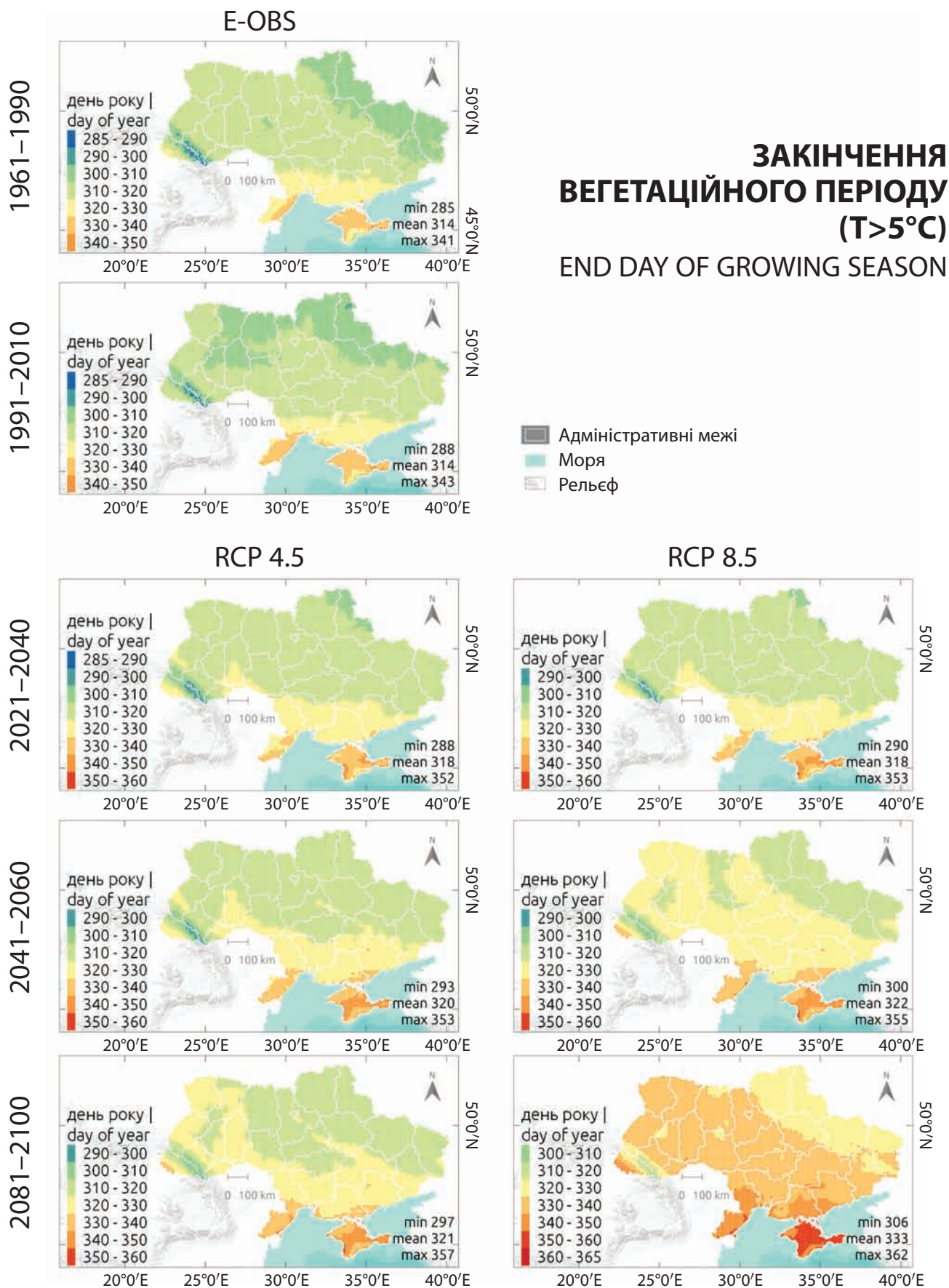


Рис. 3. Закінчення (день року) вегетаційного періоду за даними E-OBS, сценаріями RCP4.5 та RCP 8.5 у вказані періоди XX–XXI ст.

гідне закінчення вегетаційного сезону в Закарпатті, в осередку на заході Львівської області, в ареалі, що охоплює південь Хмельницької, східну частину Чернівецької та південно-західний район Вінницької областей, в Херсонській області, на переважних територіях Одеської, Миколаївської та Запорізької, південних районах Дніпропетровської та Донецької областей, на Головному пасмі Кримських гір. У південно-східних районах Одеської області, на узбережжі Запорізької та значній території АР Крим закінчення вегетаційного сезону очікується на 330–340 день, а в осередках на південному заході та сході АР Крим, вздовж узбережжя Керченського півострова та в районі мису Тарханкут — на 340–350, в локації Херсонесу — на 350–360 день.

Сценарій **RCP 8.5** для періоду **2021–2040** практично аналогічний сценарію **RCP 4.5** для цього ж періоду (рис. 3).

За реалізації сценарію **RCP 4.5**, у **2041–2060** роках саме раннє закінчення вегетаційного сезону, на 290–300 день, прогнозується у південно-східному високогір'ї Карпат, на 300–310 день — на решті території гірської країни (рис. 3). На значній території України закінчення вегетаційного сезону відбуватиметься на 310–320 день. У південній частині країни і, частково, у західній — на 320–330 день. Такі значення очікуються у Запорізькій, Херсонській, Миколаївській областях, північній частині Одеської, на півдні Донецької, Дніпропетровської, Вінницької та Тернопільської областей, на значній площі Хмельницької та Чернівецької, в ареалі Львівської області, у Закарпатті, районах Кременчуцького, Кам'янського та Дніпровського водосховищ. У південній частині Одеської, південних районах Херсонської та Запорізької областей, у північно-західній частині АР Крим та Кримських горах закінчення вегетаційного сезону очікується на 330–340 день, тобто в грудні, в районі Херсонесу — на 350–360, на решті території Кримського півострова — на 340–350 день року.

За сценарієм **RCP 8.5**, у **2041–2060** роках на 300–310 день закінчуватиметься вегетаційний сезон у високогір'ї Українських Карпат, на 310–320 — на решті території Карпатських гір (рис. 3). Закінчення на 310–320 день очікується на сході та північному сході країни: у Луганській (крім центральних районів), Чернігівській, Сумській, Харківській областях, північній частині Донецької, значній території Полтавської (крім південного заходу). Таке подовження вегетації очікується і в ареалі, що охопить східні райони Львівської, західні Тернопільської та південні Рівненської областей, а також на значних площах Житомирської та суміжних до них північних районах Вінницької та південних Київської областей. На значній території України прогнозується закінчення

вегетаційного сезону на 320–330 день, пізніше на 330–340 — у Закарпатті, південній частині Одеської, південно-східній частині Херсонської, на південному заході Запорізької областей, на узбережжя Миколаївської, Херсонської та Запорізької областей, північно-західній частині АР Крим та у Кримських горах. Ще пізніше закінчення вегетаційного сезону на 340–350 день очікується на решті Кримського півострова, а найпізніше — в районі Херсонесу на 350–360 день року.

Сценарій **RCP 4.5** у **2081–2100** роках передбачає закінчення вегетаційного сезону на 300–310 день у південно-східних Карпатах (у Чивчинських та Рахівських горах — на 290–300) (рис. 3). На 310–320 день — на решті території Карпат, в ареалі, що охопить схід Львівської, західну частину Тернопільської та південні райони Рівненської і Волинської областей, а також у Чернігівській, Сумській, Харківській, Київській, Житомирській, значних територіях Черкаської, Кіровоградської, Луганської, Полтавської, північних частинах Донецької та Вінницької областей. Закінчення вегетаційного сезону на 320–330 день очікується здебільшого у західній частині країни: у Львівській, Івано-Франківській та Чернівецькій областях (крім їх гірських територій), на значних територіях Волинської, Рівненської, Хмельницької, Дніпропетровської областей, у східній частині Тернопільської, на Полонинському та Вулканічному хребтах, у південних частинах Вінницької та Донецької областей, в Миколаївській, Херсонській, Запорізькій областях, північній частині Одеської, вздовж Дніпровських водосховищ. На 330–340 день — в Закарпатті, південній частині Одеської, південних районах Херсонської, південно-західних Запорізької областей, вздовж узбережжя Миколаївської та Запорізької областей, північно-західній частині АР Крим та у Кримських горах; на 340–350 — на решті Кримського півострова та в локаціях на південному сході Одеської області, на 350–360 — навколо місів Херсонес і Тарханкут.

Згідно сценарію **RCP 8.5**, у **2081–2100** роках найраніше закінчення вегетаційного сезону, на 310–320 день, очікується так само у південно-східних Карпатах (на окремих вершинах — 300–310) (рис. 3). Закінчення сезону на 320–330 день прогнозується у північно-східній частині України: у Чернігівській (крім південного заходу), Сумській, Харківській областях, північних частинах Полтавської та Донецької, на значних площах Луганської області, а також в ареалах на півночі Житомирської і Вінницької областей, на заході Тернопільської і на решті території Карпат. Переважна територія країни зазнає закінчення вегетаційного сезону на 330–340 день. У Закарпатті, Одеській (крім північних районів),

південно-східній частині Херсонської, південно-західних районах Запорізької, в ареалі Каховського водосховища, вздовж узбережжя Миколаївської, Херсонської, Запорізької областей, на Тарханкутському півострові, на Головному пасмі Кримських гір вегетаційний сезон закінчиться на 340–350 день, а на решті території АР Крим та в локаціях південного сходу Одеської області — на 350–360 та навіть 360–365 день, тобто по суті до 31 грудня.

ВИСНОВКИ

Для **вегетаційного періоду** в минулому характерні такі ж просторово-часові закономірності, що й для теплого періоду: збільшення тривалості з північного сходу на південь і південний захід від 200 до 290 днів і більше. Такі розподіли, що спостерігались у минулому, та зміни у сучасному кліматичних періодах будуть зберігатись до кінця ХХІ століття, але із збільшенням тривалості в залежності від інтенсивності впливу антропогенного чинника, тобто розглянутих сценаріїв.

Ранній початок теплого періоду зумовлює раннє відновлення вегетації рослин, що призводить до збільшення тривалості і зростання теплозабезпеченості у вегетаційний період. Зростання тривалості вегетаційного сезону протягом останніх десятиріч у період **1991–2010** спостерігались майже на всій території України, а найбільш значними вони були у південних, південно-східних та північно-західних регіонах країни, де зміни сягали від 7 до 14 днів, порівняно з кліматичною нормою **1961–1990**. Тривалість вегетаційного періоду зростатиме на всій території країни і до кінця століття. Ці зміни будуть більш однорідні, ніж зміни тривалості теплого періоду, з найінтенсивнішими змінами впродовж століття за сценарієм **RCP 8.5**.

В короткостроковій перспективі (**2021–2040**) за сценарієм **RCP 4.5** майже на всій території країни вегетаційний період збільшиться на 14 днів порівняно з базовим періодом **1991–2010**, за винятком АР Крим, окремих районів Одеської, Чернівецької, Хмельницької та Тернопільської областей, де отримано подовження вегетаційного періоду на понад 20 днів. В сценарії **RCP 8.5** прогнозується подовження вегетаційного сезону від 14 до 21 дня майже на всій території країни. У Карпатах менше — до 7 днів, а у південних областях та в АР Крим до 28 днів. У найближчі десятиліття сценарії **RCP 4.5** і **RCP 8.5** прогнозують аналогічні просторові розподіли тривалості вегетаційного періоду, але з певними регіональними особливостями відносно сучасного періоду **1991–2010**. Майже на всій території країни тривалість вегетаційного періоду очікується від 220 до 240 днів. У ХХ і на початку ХХІ сторіччя такі умо-

ви були характерні лише для південних областей країни. Вегетаційний сезон тривалістю у 180–200 днів буде відмічатись лише на високогір'ї Карпат, хоча у **1961–1990** такі умови були характерні і для північного сходу країни. Майже на 200 км на північ пошириться територія з тривалішим вегетаційним періодом (240–260 днів), яка охопить майже всю територію південного степу. Такі умови вперше будуть спостерігатись і в окремих районах Прикарпаття. У степовій частині Криму тривалість вегетаційного періоду збільшиться до 300 днів, у той час як у сучасний період такі умови спостерігались лише в окремих районах.

На середину ХХІ сторіччя у період **2041–2060** за реалізації сценарію **RCP 4.5** майже на всій території України тривалість вегетаційного сезону відносно сучасного періоду **1991–2010** зросте на три тижні (21 день), а в АР Крим, південних районах Одеської та Херсонської областей — на чотири (до 28 днів). В АР Крим тривалість вегетаційного сезону очікується у 280–300 днів, за винятком Кримських гір та окремих районів північно-східного узбережжя Чорного моря. Вегетаційний період тривалістю у 240–280 днів очікується як у південному, так і у північному степу, на Закарпатті та в Прикарпатті. На решті території, за винятком Карпат і північно-східних районів Сумської області, тривалість даного періоду становитиме 220–240 днів. Сценарій **RCP 8.5** прогнозує більш інтенсивне зростання тривалості періоду вегетації: від 18 днів у південно-східних та центральних областях до 34 днів в АР Крим, Чернівецькій області, південних районах Одеської, Хмельницької та Тернопільської областей. Такі зміни призведуть до того, що в середині століття на значній території країни вегетаційний період триватиме 240–260 днів, тобто будуть спостерігатись такі кліматичні умови, які в середині ХХ століття були характерні лише для Кримського півострова, Закарпаття та південних районів Одеської області. У степовій частині Криму вегетація вперше триватиме 300–320 днів, що у другій половині ХХ століття було характерно лише для його південного узбережжя.

На кінець ХХІ сторіччя у період **2081–2100** за сценарієм помірних концентрацій **RCP 4.5** зміни тривалості вегетаційного періоду будуть аналогічними сценарію **RCP 8.5** для середини століття. При реалізації **RCP 8.5** тривалість даного сезону зросте на 40–70 днів, посилюючись зі сходу на захід. Такий процес призведе до небувалих наслідків: вперше на території України з'являться регіони, де вегетація триватиме практично протягом усього року. Такий результат отримано для південного узбережжя Кримського півострова, у степовій частині

Криму та в окремих південних районах Одеської області. Тривалий вегетаційний період, 280–300 днів, прогнозується не лише в окремих районах Кримського півострова, як це характерно для сучасного періоду, а й на значній території країни: у південних та західних областях і навіть на Київщині. Тривалість вегетаційного сезону, яка на початку століття була характерна лише для узбережжя Чорного моря та Кримського півострова, у кінці століття за реалізації сценарію найвищих концентрацій може бути характерною й на крайньому північному сході країни та в Українських Карпатах. Очевидно, що це значно змінить і потребуватиме швидкої адаптації екосистем і ведення агропромислової діяльності з урахуванням не тільки тривалості вегетації, але й потреб у зволоженні територій країни.

У цілому отримані результати можуть бути базою для оцінки ризиків і вразливості до зміни клімату та розробки відповідних заходів із адаптації сільського і лісового господарств, для яких період вегетації є визначальним для стійкого розвитку. Отримані проєкції тривалості і дат початку та закінчення вегетаційного сезону у майбутні періоди дозволять визначити, наприклад, сортовий склад у плодівництві (ягідівництві, садівництві і горіхівництві), луківництві та лісівництві, тобто у тих підгалу-

зях рослинництва, де використовуються багато-річні рослини, та спланувати рільництво для стійкого економічного розвитку країни. Таким чином, представлені результати можуть бути використані у розробці секторальних, національної, обласних, районних та муніципальних стратегій із адаптації до зміни клімату.

У двох наступних запланованих авторами публікаціях цього циклу буде представлено аналіз проєкцій інших важливих показників термічного режиму в Україні до кінця ХХІ сторіччя: періоду активної вегетації рослин ($T_{\text{сеп}} > 10^{\circ}\text{C}$) і кліматичного літа ($T_{\text{сеп}} > 15^{\circ}\text{C}$), які отримані за тими самими детальними даними ансамблю 34 РКМ для двох сценаріїв репрезентативних концентрацій за допомогою аналогічних методологічних підходів.

Подяка. Дослідження виконано в УкрГМІ в рамках НДР 2/23 “Розроблення оновлених сценаріїв зміни кліматичних характеристик термічних періодів в Україні до кінця ХХІ ст. для потреб енергетичного, сільськогосподарського та інших секторів економіки” (№ держ. реєстрації 0123U100461). Автори щиро вдячні ЗСУ та всім, хто захищає Україну і допомагає фронту, за можливість продовжувати наукову діяльність.

ЛІТЕРАТУРА

- Атлас “Агрокліматичні ресурси України” (2016) / за ред. Т.І. Адаменко, М.І. Кульбіді, А.Л. Прокопенка. Київ: ТОВ “Українська картографічна група”.
- Балабух В.О. (2017) Зміна кліматичних умов в Україні та її вплив на сільськогосподарське виробництво. *Всеукраїнський аграрний журнал “АгроЕліта”*. URL: <https://agroelita.info/zmina-klimatychnyh-umov-v-ukrajini-ta-jiji-vplyv-na-silskohospodarske-vyrobnytstvo/>
- Ботанико-фармакогностический словарь: справ. пособие (1990) / под ред. К.Ф. Блиновой, Г.П. Яковлева. М.: Высш. шк.
- Дати переходу температури повітря в Україні за сучасних умов клімату (2010) / за ред. В.І. Осадчого, В.М. Бабіченко. Київ: Вид-во “Ніка-Центр”.
- Дем’янюк О.С., Шерстобоева О.В., Клименко А.М., Чабанюк Я.В. (2016) Вплив гідротермічного режиму вегетації на екологічний стан ґрунту та врожайність кукурудзи. *Агроекологічний журнал*, 3, 45–50.
- Дослідження регіональних особливостей зміни клімату в Україні у ХХІ ст. на основі чисельного моделювання: звіт про НДР (заключний). (2013) Шифр роботи 1/11. К.: УГМІ. 173 с. № ДР 0111U001571.
- Заболоцька Т.М., Скриник О.А. (2009) Прогнозування дат стійкого переходу середньої добової температури повітря через зазначені межі. *Наук праці УкрНДГМІ*, 25, 84–105.
- Заболоцька Т.М., Шпиг В.М., Ціла А.Ю. (2021) Циркуляційні процеси та хмарний покрив упродовж періоду глобального потепління. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 1 (59), 76–91. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.8>
- Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату: колективна монографія (2018) / за ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. Одеський державний екологічний університет. Одеса: Вид-во “ТЕС”.
- Клімат України: колективна монографія (2003) / за редакцією В.М. Липінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. Київ: Вид-во Раєвського.
- КМУ. (2019) Про затвердження Правил надання послуги з постачання теплової енергії і типових договорів про надання послуги з постачання теплової енергії: постанова Кабінету Міністрів України від 21 серпня 2019 р. № 830. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/830-2019-%D0%BF#Text>
- КМУ. (2022) Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової програми використання та охорони земель: розпорядження Кабінету Міністрів України від 19 січня 2022 р. № 70-р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/70-2022-%D1%80#Text>
- Краковська С.В., Гнатюк Н.В., Шпиталь Т.М., Паламарчук Л.В. (2016а). Проєкції змін приземної температури повітря за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей у регіонах України в ХХІ столітті. *Наук. праці УкрГМІ*, 268, 33–44.
- Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Шпиталь Т.М. (2016б). Електронні бази метеорологічних даних та результати чисельних кліматичних моделей у визначенні спеціалізованих кліматичних показників. *Гідрологія, гідрохімія та гідроекологія*, 3 (42), 95–105.
- Краковська С.В., Шпиталь Т.М. (2018) Дати переходу температури повітря через 0, 5, 10 і 15°C та тривалість відповідних кліматичних сезонів з другої половини ХХ до середини ХХІ ст. в Україні. *Геоінформатика*, 4 (68), 74–92.

- Краковська С.В., Шпиталь Т.М., Чигарева А.Ю., Писаренко Л.А., Криштоп Л.Ю. (2023) Кліматичні характеристики термічних періодів в Україні до кінця XXI ст. Частина I: теплий період. *Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля*, 2 (4), 35–50. DOI <http://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.035>
- Лозовіцький П.С. (2010) Основи землеробства та рослинництва. Книга 2. Рослинництво: посібник для вищих навчальних закладів / за ред. П.С. Лозовіцький. К.
- Мартазінова В., Ставнічук В., Корнієнко Є. (2023) Сучасний клімат на заході України від початку 21 століття: монографія. Одеса: Видавничий дім "Гельветика".
- Паламарчук, Л.В., Краковська, С.В. (2018) Регіональні зміни клімату України: методичні вказівки до навчального курсу для студентів географічного факультету спеціальності "Метеорологія та кліматологія". Київ: Прінт-Сервіс.
- Польовий А.М., Божко Л.Ю. (2015) Теплові ресурси України в умовах зміни клімату. *Український гідрометеорологічний журнал*, 16, 99–106. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.13>
- Польовий А.М., Божко Л.Ю., Барсукова О.А. (2017) Вплив змін клімату на агрокліматичні умови вегетаційного періоду основних сільськогосподарських культур. *Український гідрометеорологічний журнал*, 20, 61–70. <https://doi.org/10.31481/uhmj.20.2017.07>
- Польовий А.М., Божко Л.Ю., Вольвач О.В. (2004) Основи агрометеорології: конспект лекцій. Одеса: Вид-во "ТЕС".
- Розроблення оновлених сценаріїв зміни кліматичних характеристик термічних періодів в Україні до кінця XXI ст. для потреб енергетичного, сільськогосподарського та інших секторів економіки: звіт про НДР (остаточний). (2024) Шифр роботи 2/23. К.: УкрГМІ. 194 с. № ДР 0123U100461.
- Розроблення оновлених сценаріїв зміни характеристик регіонального клімату України до кінця XXI ст.: звіт про НДР (остаточний). (2021) К.: УкрГМІ. 231 с. № ДР 0119U001123.
- Рибченко, Л.С., Савчук, С.В. (2023). Складові радіаційного режиму сонячної радіації при посухах за 1991–2020 рр. в Україні. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 2 (68), 63–74. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.2.7>
- Садовська, Н.П., Попович, Г.Б., Гамор А.Ф. (2023) Еколого-біологічні особливості овочевих культур: методичні розробки до вивчення курсу "Овочівництво" для студентів спеціальності 203 "Садівництво та виноградарство". Ужгород: Видавництво УжНУ "Говерла".
- Скриник, О.А., Скриник, О.Я. (2006) До проблеми визначення дати стійкого переходу середньої добової температури повітря через фіксоване значення. *Наук. праці УкрНДГМІ*, 255, 42–56.
- Сніжко, С.І., Скриник, О.А., Щербань, І.М. (2007) Особливості тривалості вегетаційного періоду і періоду активної вегетації на території України (тенденції зміни внаслідок глобального потепління). *Український гідрометеорологічний журнал*, 2, 119–128
- Хохлов, В.М., Ермоленко Н.С. (2015) Майбутні зміни клімату та їх вплив на режим опадів та температури в Україні. *Український гідрометеорологічний журнал*, 16, 76–82. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10>
- Швиденко, А.З., Букша, І.Ф., Краковська, С.В. (2018) Уразливість лісів України до зміни клімату: монографія. Київ: Вид-во "Ніка-Центр".
- Шевченко, О.Г., Сніжко С.І., Вітренко А.О. Економічна метеорологія: підручник (2019) К.: Майстер книг.
- Шедеменко, І.П., Краковська, С.В., Гнатюк, Н.В. (2012) Верифікація даних Європейської бази E-OBS щодо приземної температури та кількості опадів адміністративних областях України. *Наук. пр. УкрНДГМІ*, 262, 71–90.
- Яровий, Г.І., Романов, О.В. (2017) Овочівництво: навч. посіб. / за ред. Г.І. Яровицького, О.В. Романова. Харків: ХНАУ.
- Breakout Group 3bis: Bias Correction (pp. 21–23) in IPCC (2015): Workshop Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Workshop on Regional Climate Projections and their Use in Impacts and Risk Analysis Studies [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, and M. Tignor (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, pp. 171. https://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material/RPW_WorkshopReport.pdf (Accessed: 10.12.2023).
- Cornes, R.C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E.J.M., & Jones, P.D. (2018). An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123 (17), 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- Evaluating Vegetation Cover Change Contribution into Greenhouse Effect by Remotely Sensed Data: Case Study for Ukraine. (2007) SpringerLink.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., ... Yiou, P. (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14 (2), 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Lalic, B., Eitzinger, J., Dalla Marta, A., Orlandini, S., Firanj Sremac, A., Pacher, B. (2018) *Agricultural Meteorology and Climatology*. Firenze: Firenze University Press.
- Mean Projections for Ukraine in Climate Scenarios. (2021) World Bank Climate Change Knowledge Portal. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/ukraine/climate-data-historical>
- Predicting the Distribution of Invasive Plants in the Ukrainian Carpathians under Climatic Change. (2021) Cambridge University Press
- Schulzweida, Uwe. (2019, October 31). CDO User Guide (Version 1.9.8). <http://doi.org/10.5281/zenodo.3539275>
- Summary for Policymakers. (2022a) In *Global Warming of 1.5°C* (pp. 1–24). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- Summary for Policymakers. (2022b) In *Climate Change and Land* (pp. 1–36). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.001>
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., & Meehl, G.A. (2012) An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (4), 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Technical Summary. (2023) In *Climate Change 2021 — The Physical Science Basis* (pp. 35–144). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- The WCRP Coupled Model Intercomparison Project — Phase 5 (CMIP5) — *CLIVAR Exchanges* Special Issue. (2011) 56 (16), 32 pp.
- WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals (2017). WMO-No. 1203. 574 p. <https://www.ecad.eu> <https://www.esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cordex-ipsl> <https://www.euro-cordex.net> <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5>

REFERENCES

- Atlas "Agroclimatic resources of Ukraine" (2016) / edited by T.I. Adamenko, M.I. Kulbida, A.L. Prokopenko. Kyiv: LLC "Ukrainian cartographic group" [in Ukrainian].
- Balabukh, V.O. (2017) Climate change in Ukraine and its impact on agricultural production. All-Ukrainian agrarian journal "AgroE-lita". URL: <https://agroelita.info/zmina-klimatychnyh-umov-ukrajini-ta-jiji-vplyv-na-silskohospodarske-vyrobnystvo/> [in Ukrainian]
- Botanical-pharmacognostic dictionary: cases. manual (1990) / editor. K.F. Blynovai, G.P. Yakovleva. M.: Higher School. [in Russian]
- Dates of air temperature transition in Ukraine under modern climate conditions (2010) / edited by V.I. Osadchyo, V.M. Babichenko. Kyiv: Nika-Center Publishing House. [in Ukrainian].
- Demyaniuk, O.S., Sherstoboyeva, O.V., Klymenko, A.M., Chabanyuk Y.V. (2016) The influence of the hydrothermal regime of vegetation on the ecological state of the soil and the yield of corn. *Agroecological Journal*, 3, 45–50. [in Ukrainian]
- Study of regional features of climate change in Ukraine in the 21st century. based on numerical simulation: Report on Scientific Research Work (final). (2013) Work cipher 1/11. K.: UGMI. 173 p. State Registration № 0111U001571. [in Ukrainian]
- Zabolotska, T.M., Skrynyk, O.A. (2009) Forecast of data to the stable change of earth mean daily temperature through appointed limits. *Science Proceedings of UHMI*, 25, 84–105 [in Ukrainian]
- Zabolotska, T.M., Shpyg, V.M., Tsila, A.Yu. (2021). Circulation processes and cloud cover during the period of global warming. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 1 (59), 76–91. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.8> [in Ukrainian].
- Climatic risks of the functioning of branches of the economy of Ukraine in the conditions of climate change: a collective monograph (2018). / edited by S.M. Stepanenko, A.M. Polovoy. Odesa State Environmental University. Odesa: "TES" publishing house. [in Ukrainian]
- Climate of Ukraine: collective monograph (2003) / edited by V.M. Lipinsky, V.A. Dyachuka, V.M. Babichenko. Kyiv: Raevsky Publishing House [in Ukrainian]
- Cabinet of Ministers of Ukraine. (2019) On the approval of the Rules for the provision of heat energy supply services and standard contracts for the provision of heat energy supply services: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 21, 2019. № 830. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/830-2019-%D0%BF#Text> [in Ukrainian]
- Cabinet of Ministers of Ukraine. (2022) On the approval of the Concept of the State-wide target program for land use and protection: order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated January 19, 2022, № 70-p. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/70-2022-%D1%80#Text> [in Ukrainian]
- Krakovska, S.V., Gnatiuk, N.V., Shpytal, T.M., Palamarchuk, L.V. (2016a) Projections of surface air temperature changes based on data of regional climate models' ensemble in the regions of Ukraine in the 21st century. *Science Proceedings of UHMI*, 268, 33–44 [in Ukrainian]
- Krakovska, S.V., Palamarchuk, L.V., Shpytal, T.M. (2016b). Electronic databases and results of numerical simulations in defining specialized climate indices. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 3 (42), 95–105 [in Ukrainian]
- Krakovska, S.V., Shpytal, T.M. (2018) Dates of air temperature transition over 0, 5, 10 and 15°C and corresponding lengths of climatic seasons from the second part of the 20th to the middle of the 21st century in Ukraine. *Geoinformatika*, 4 (68), 74–92 [in Ukrainian]
- Krakovska, S., Shpytal, T., Chyhareva, A., Pysarenko, L., Kryshtop, L. (2023). Climatic characteristics of thermal periods in Ukraine until the end of the 21st century. Part I: warm period Meteorology. *Hydrology. Environmental monitoring*, 2 (4), 35–50. DOI: <http://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.035> [in Ukrainian]
- Lozovitskyi P.S. (2010) Basics of agriculture and crop production. Book 2. Crop production: a manual for higher educational institutions / edited by P.S. Lozovitskyi. K. [in Ukrainian]
- Martazinova V., Stavnichuk V., Kornienko E. (2023) The modern climate in the west of Ukraine since the beginning of the 21st century: a monograph. Odesa: "Helvetika" Publishing House. [in Ukrainian]
- Palamarchuk, L.V., Krakovska, S.V. (2018) Regional changes in the climate of Ukraine: methodological guidelines for the study course for students of the Faculty of Geography majoring in "Meteorology and Climatology". Kyiv: Print-Service. [in Ukrainian]
- Pol'ovyi, A.M., & Bozhko, L.Yu. (2015) Thermal resources of Ukraine in the conditions of climate change. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 16, 99–106. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.13> [in Ukrainian]
- Polevoy, A.N., Bozhko, L.E., & Barsukova, E.A. (2017). Impact of climat changes on agro-climatic indices of the vegetative period of main agricultural crops. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 20, 61–70. <https://doi.org/10.31481/uhmj.20.2017.07> [in Ukrainian]
- Pol'ovyi, A.M., Bozhko, L.Yu., Volvach, O.V. (2004) Basics of agrometeorology: lecture notes. Odesa: "TES" publishing house. [in Ukrainian]
- Development of updated scenarios of changes in climatic characteristics of thermal periods in Ukraine until the end of the 21st century. for the needs of the energy, agricultural and other sectors of the economy: Report on scientific research work (final). (2024) Job code 2/23. K.: UHMI. 194 p. State Registration № 0123U100461. [in Ukrainian]
- Development of updated scenarios of changes in the characteristics of the regional climate of Ukraine by the end of the 21st century: Report on scientific research work (final). (2021) K.: UHMI. 231 p. State Registration № 0119U001123. [in Ukrainian]
- Rybchenko, L.S., Savchuk, S.V. (2023). Components of the radiation regime of solar radiation during droughts for 1991–2020 in Ukraine. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 2 (68), 63–74. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.2.7> [in Ukrainian]
- Sadovska, N.P., Popovych, G.B., Gamor, A.F. (2023) Ecological and biological features of vegetable crops: methodological developments for the study of the course "Vegetables" for students of the specialty 203 "Horticulture and viticulture". Uzhgorod: Publishing House of UzhNU "Hoverla" [in Ukrainian].
- Skrynyk, O.A., Skrynyk, O.Ya. (2006) To the problem of determining the date of stable transition of the average daily air temperature through a fixed value. *Science Proceedings of UHMI*, 255, 42–56. [in Ukrainian]
- Snizhko, S.I., Skrynyk, O.A., Shcherban I.M. (2007) Peculiarities of the duration of the vegetation period and the period of active vegetation on the territory of Ukraine (trends of change due to global warming). *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 2, 119–128. [in Ukrainian]
- Khokhlov, V., & Yermolenko, N. (2015). Future climate change and it's impact on precipitation and temperature in Ukraine.

- Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 16, 76–82. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10> [in Ukrainian]
- Shvydenko, A., Buksha, I., Krakovska, S. (2018). Vulnerability of Ukraine's forests to climate change: monograph. Kyiv: Nika-Center Publishing House. [in Ukrainian]
- Shevchenko, O.H., Snizhko, S.I., Vitrenko, A.O. (2019) Economic meteorology: a textbook: Master books [in Ukrainian]
- Shedemenko, I.P., Krakovska, S.V., Gnatiuk, N.V. (2012) Verification of surface temperature and precipitation from European gridded data set E-OBS for administrative regions in Ukraine. *Science Proceedings of UHMI*, 262, 71–90. [in Ukrainian]
- Yarovy, G.I., Romanov, O.V. (2017) Vegetable growing: a study guide / edited by G.I. Yarovytskyi, O.V. Romanov. Kharkiv: KHNAU. [in Ukrainian]
- Breakout Group 3bis: Bias Correction (pp. 21–23) in IPCC (2015): Workshop Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Workshop on Regional Climate Projections and their Use in Impacts and Risk Analysis Studies [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, and M. Tignor (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, pp. 171. https://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material/RPW_WorkshopReport.pdf (Accessed: 10.12.2023).
- Cornes, R.C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E.J.M., & Jones, P.D. (2018). An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123 (17), 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- Evaluating Vegetation Cover Change Contribution into Greenhouse Effect by Remotely Sensed Data: Case Study for Ukraine. (2007) SpringerLink.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., ... Yiou, P. (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14 (2), 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Lalic, B., Eitzinger, J., Dalla Marta, A., Orlandini, S., Firanj Sremac, A., Pacher, B. (2018) Agricultural Meteorology and Climatology. Firenze: Firenze University Press.
- Mean Projections for Ukraine in Climate Scenarios. (2021) World Bank Climate Change Knowledge Portal.
- Predicting the Distribution of Invasive Plants in the Ukrainian Carpathians under Climatic Change. (2021) Cambridge University Press
- Schulzweida, Uwe. (2019, October 31). CDO User Guide (Version 1.9.8). <http://doi.org/10.5281/zenodo.3539275>
- Summary for Policymakers. (2022a). In Global Warming of 1.5°C (pp. 1–24). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- Summary for Policymakers. (2022b). In Climate Change and Land (pp. 1–36). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.001>
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., & Meehl, G.A. (2012) An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (4), 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Technical Summary. (2023) In Climate Change 2021 — The Physical Science Basis (pp. 35–144). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- The WCRP Coupled Model Intercomparison Project — Phase 5 (CMIP5) — CLIVAR Exchanges Special Issue. (2011) 56(16), 32 pp.
- WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals (2017). WMO-No. 1203. 574 p. <https://www.ecad.eu>
<https://www.esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cordex-ipsl>
<https://www.euro-cordex.net>
<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5>

Svitlana KRAKOVSKA^{1*}

ORCID: 0000-0001-9972-0937
krasvit@ua.fm,

Tetiana SHPYTAL¹

ORCID: 0009-0001-7731-4521
tetianashpytal@gmail.com,

Anastasia CHYHAREVA^{1,2}

ORCID: 0000-0003-0195-751X
achyhareva@gmail.com,

Svitlana SAVCHUK¹

ORCID: 0009-0007-7861-9419
svetlanasvs120676@gmail.com,

Lidiia KRYSHTOP^{1,3}

ORCID: 0009-0003-8863-9422
lidiia.kryshstop@gmail.com

¹ Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

² National Antarctic Scientific Center of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv

³ UNIGIS, Vrije Universiteit Amsterdam, Netherlands

CLIMATE CHARACTERISTICS OF THERMAL PERIODS IN UKRAINE UNTIL THE END OF THE 21ST CENTURY. Part II: GROWING SEASON

The article presents the results of the study of thermal periods in Ukraine, namely its second part, which considers the duration and dates of the beginning and end of the growing season, which is determined by the persistent transition of the average daily air temperature through the value of 5°C. Climatic characteristics of the growing season determine the beginning and end of agricultural work, as well as a number of other activities that are carried out, for example, in forestry and other farms. The methods for determining climatic characteristics in this study were similar to those used in the first part, where changes in the warm period were analyzed (Krakovska et al., 2023, <http://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.035>). The values of the climatic characteristics of the growing season for the climatological norm 1961–1990 and the base period 1991–2010 were calculated using data from the European E-OBS database, and projections of changes relative to the base and values in the future three periods (2021–2040, 2041–2060 and 2081–2100) were calculated using daily data from 34 regional climate models (RCMs) of the international initiative for Europe Euro CORDEX under the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. The calculations used the `eca_gsl` function of the CDO (Climate Data Ope-

rator) software package to determine the dates of the steady temperature transition through 5°C. To correct the differences in the masks in E-OBS and the RCM ensemble due to the difference in the number of grid points mainly on the coastal line, the geographic information system QGIS 3.28 were used, with the help of which mapping was also carried out for visualization and analysis of the results with subsequent presentation in the form of maps in an electronic atlas using JavaScript-Leaflet library. The growing season length will increase throughout the country until the end of the century. These changes are expected to be more uniform than changes in the duration of the warm period. The duration of the growing season, which at the beginning of the 21st century was characteristic only for the

southern coast of the Black Sea and the Crimean Peninsula, at the end of the century, under the implementation of the high-concentration scenario RCP 8.5, may also be characteristic of the far northeast of the country and the Ukrainian Carpathians. It is obvious that this will significantly change and will require rapid adaptation of ecosystems and changes in forestry and agro-industrial practices. The presented results can be used in the development of sectoral, national, regional and municipal strategies for adaptation to climate change.

Keywords: thermal regime, climate change, representative concentration pathways, climate characteristic projections, date of persistent air temperature transition.



Б.Ф. Христюк

ORCID:0000-0003-4290-3745
khryst@uhmi.org.ua

Український гідрометеоро-
логічний інститут
Державної служби України
з надзвичайних ситуацій
та НАН України, Київ

УДК 556.06+556.535(282.247.32)

DOI: [https://doi.org/10.15407/
Meteorology2024.06.050](https://doi.org/10.15407/Meteorology2024.06.050)

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ДОВГОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ СТРОКІВ РУЙНУВАННЯ ЛЬОДОСТАВУ ТА ОЧИЩЕННЯ ВІД ЛЬОДУ НА ДНІПРОВСЬКИХ ВОДОСХОВИЩАХ

Стаття присвячена створенню автоматизованої системи "Ice-Spring" для довгострокового прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду шляхом написання комп'ютерної програми для її подальшого використання в оперативній роботі Українського гідрометеорологічного центру ДСНС України (УкрГМЦ). Для автоматизації процесу прогнозування створено програмне забезпечення системи "Ice-Spring", яке написано на мовах програмування C# та C++ у середовищі Visual Studio 2022 Community Edition у вигляді Windows форм та консольних додатків. Система "Ice-Spring" дозволяє кожного року виконувати довгострокове прогнозування дат руйнування льодоставу (20 лютого) та очищення від льоду (5 березня) на 36 гідрологічних постах водосховищ Дніпровського каскаду. Прогнозування здійснюється за 12 прогнозними залежностями на основі регресійних зв'язків між датами на постах-індикаторах та телеконекційними показниками. При цьому, використовуються середні місячні значення 11 телеконекційних показників, які впливають на процеси руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду і, які визначаються Національною службою погоди Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США. Прогнозування на інших постах виконується за 60 регресійними залежностями між датами на цих постах і датами на постах-індикаторах. Створене програмне забезпечення автоматизованої системи довгострокового прогнозування "Ice-Spring" пройшло успішне тестування і показало свою працездатність за незалежними даними 2021 року. При цьому, виконана перевірка ефективності прогнозування надала прийнятні результати, оскільки з 12 прогнозів тільки 2 прогнози не справдились. Система "Ice-Spring" передана в УкрГМЦ для випробування і оперативного використання.

Ключові слова: довгострокове прогнозування, руйнування льодоставу, очищення від льоду, Дніпровські водосховища, програмне забезпечення, автоматизована система.

ВСТУП

Автоматизація процесу гідрологічного прогнозування є важливою частиною створення будь-якої сучасної системи, комплексу, які дозволяють скласти прогнози гідрологічних характеристик різної завчасності (Lewis et al., 2018; Škerjanec, 2022). Зазвичай системи прогнозування використовують значні масиви гідрометеорологічної інформації (історичної, прогнозної), які зберігаються у різних базах даних. В основі таких систем прогнозування є гідрологічна модель. У процесі гідрологічного моделювання, а також для представлення його результатів можуть використовуватися географічні інформаційні системи (ГІС), які мають свої бази даних. Іноді результати моделювання необхідно надавати у зручній для користувача формі, що вимагає

створення окремого програмного забезпечення (Христюк, 2023). Отже, процес гідрологічного прогнозування є досить складним і важким завданням для гідролога-прогнозиста, який ще і потребує досить швидкого виконання для своєчасного оперативного інформування як громадськості, так і відповідних державних структур. Складність такого процесу характерна навіть для прогнозування гідрологічних характеристик для малих водозборів річок. Зрозуміло, що для середніх і великих річок складність підвищується у декілька разів. Саме тому, як показано у праці Жаннетти Шакірзанової (2023) сучасне гідрологічне прогнозування базується на автоматизованих комп'ютерних моделювальних системах або комплексах. Отже, об'єднання всього процесу гідрологічного прогнозування в єдину

автоматизовану систему є важливим завданням, яке дозволяє спростити і пришвидшити складання гідрологічних прогнозів.

Сьогодні у світі використовуються різноманітні моделювальні комплекси як для коротко-, так і для довгострокового гідрологічного прогнозування. Так, наприклад, автоматизований підхід до гідрологічного моделювання та моделювання якості води в масштабі водозбірного басейну р. Картейра (Португалія), який автоматично створює відповідні моделі на основі знань про моделювання предметної області та даних вимірювань представлено у праці Škerjanec M. (2022). Центр повеней штату Айова розробив систему прогнозування повеней і розповсюдження інформації в реальному часі для використання всіма жителями Айови (Krajewski et al., 2017). Для річки ВуГіа-Тху Бон, яка розташована у провінції Куанг Нам у В'єтнамі була випробувана система прогнозування повеней у реальному часі, яка об'єднує системи гідрологічного та гідравлічного моделювання на основі моделей SWAT і HEC-RAS, мережу метеорологічних станцій і гідрологічних постів з веб-візуалізацією результатів моделювання (Loi et al, 2019).

В Україні також створені автоматизовані системи гідрологічного прогнозування, які використовуються Українським гідрометеорологічним центром (УкрГМЦ) в оперативному прогнозуванні. Розробкою і створенням автоматизованих систем прогнозування водного стоку річок займався Михайло Сусідко, а також його учні — Ольга Лук'янець, Тетяна Маслова, Вероніка Дутко (2000, 2004, 2007, 2010), Наталія Приймаченко (2010), Станіслав Москаленко (2013). Ці автоматизовані системи прогнозування написані на мові програмування Fortran і описують процеси формування стоку води різного генезису р.р. Прип'ять, Дніпро, Дністер, Південний Буг, Західний Буг, Сіверський Донець, Тиса. У працях Євгенія Гопченко і Жанетти Шакірзанової (2006, 2015) розроблено автоматизовані моделювальні комплекси довгострокового прогнозування гідрологічних характеристик рівнинних річок. Борисом Христюком розроблено аналітично-експертна система "Істер" для прогнозування рівнів води на р. Дунай (2013), автоматизовані системи для короткострокового прогнозування: "Dniester-Influx"(2017) (приплив води до Дністровського водосховища та "FFS Stryi" (2022) (паводки у басейні р. Стрий).

УкрГМЦ має також автоматизовані системи прогнозування льодового режиму річок і водосховищ України. Так, Михайлом Сусідко та ін. (2007) розроблена автоматизована система короткострокового прогнозування характеристик льодового режиму рівнинних річок і водосховищ України. Борисом

Христюком (2023) розроблено автоматизовану систему "Ice-Autumn" для довгострокового прогнозування дат появи льодових явищ та встановлення льодоставу на водосховищах Дніпровського каскаду. Разом з цим, УкрГМЦ випускає також довгострокові прогнози щодо настання строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду. Методика для створення таких прогнозів представлена у праці Бориса Христюка та Людмили Горбачової (2023), але відповідної автоматизованої системи не було створено.

Метою дослідження є створення автоматизованої системи довгострокового прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду шляхом написання комп'ютерної програми для її подальшого використання в оперативній роботі УкрГМЦ.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Впродовж 20-го століття на р. Дніпро було створено шість водосховищ, які послідовно було об'єднано в єдиний водогосподарський комплекс (Водний фонд України, 2014) (рис. 1). Цей комплекс дозволяв виробляти електроенергію, забезпечував водою мільйони людей і велику кількість промислових та сільськогосподарських підприємств і комунальних господарств, а також, особливо остан-

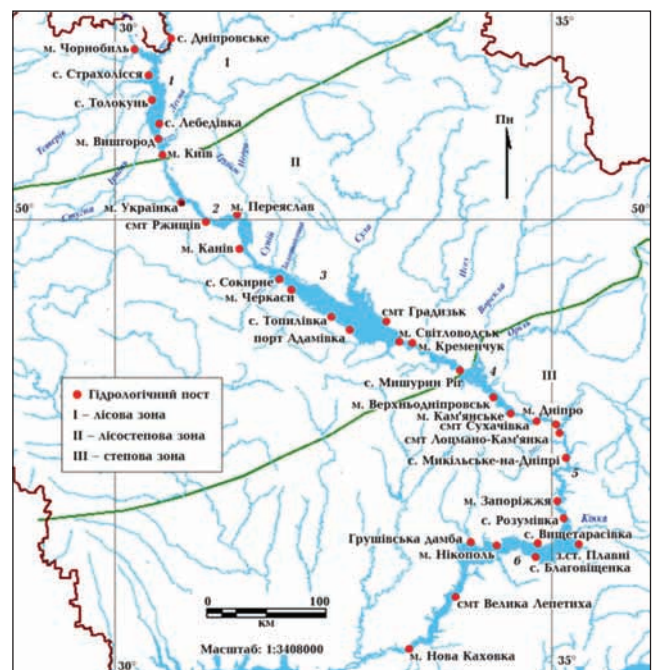


Рис. 1. Каскад Дніпровських водосховищ та схема розташування гідрологічних постів: 1 — вдсх Київське; 2 — вдсх Канівське; 3 — вдсх Кременчуцьке; 4 — вдсх Кам'янське; 5 — вдсх Дніпровське; 6 — вдсх Каховське, наведено у межах до 06.06.2023 (Христюк та Горбачова, 2023)

нім часом, був важливою транспортною артерією і рекреаційною зоною (Вишневський та ін., 2011). На жаль, російські окупанти вночі 6 червня 2023 року підірвали Каховську гідроелектростанцію (ГЕС), 22 березня 2024 року вдарили ракетами по греблі Дніпровської ГЕС, влучивши в ГЕС-1 і ГЕС-2, а 26 серпня 2024 року також відбулася ракетна атака по греблі Київської ГЕС. Як наслідок, Каховська і Дніпровська ГЕС були повністю зруйновані, Київська ГЕС отримала значні пошкодження, а Каховське водосховище було зневоднено (Чорноморець та ін., 2023). Отже, сьогодні каскад Дніпровських водосховищ може виконувати свої функції лише частково. Разом з цим, в таких складних умовах воєнного часу актуальність прогнозування льодових явищ зростає, оскільки вони безпосередньо впливають на роботу гідротехнічних споруд (Сусідко та ін., 2007; Христюк, 2013). Необхідно врахувати і той факт, що Кабінетом міністрів України прийнято рішення згідно якого у післявоєнний час планується відбудова Каховської ГЕС та наповнення Каховського водосховища (Постанова Кабінету міністрів України, 2023). Отже, у дослідженні створення автоматизованої системи довгострокового прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду виконано для 36 гідрологічних постів, які розташовані на шести водосховищах Дніпровського каскаду.

Вихідними даними для створення такої системи слугували, перш за все, методики, які було розроблено у праці Бориса Христюка та Людмили Горбачової (Христюк та Горбачова, 2023). Отже, було використано наступні дані:

- 12 регресійних рівнянь, які відображають залежність між датами руйнування льодоставу (6 рівнянь) і очищення від льоду (6 рівнянь) на постах-індикаторах та телеконнекційними показниками;
- 60 регресійних рівнянь, які відображають залежність між датами руйнування льодоставу (30 рівнянь) і очищення від льоду (30 рівнянь) на постах-індикаторах та датами на інших постах водосховищ;
- середні місячні значення 11 телеконнекційних показників, які впливають на процеси руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду і, які визначаються Національною службою погоди (National Weather Service, NWS) Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США (National Oceanic & Atmospheric Administration USA, NOAA) і наводяться на їхньому сайті https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/MD_index.php.

Алгоритм створення автоматизованої системи прогнозування (АСП) відображає послідовні кроки,

які взаємопов'язані між собою (Бандоріна та ін., 2022). Так, на першому етапі виконується розроблення структури АСП, яка охоплює всі необхідні її функції. Наступним важливим етапом є аналіз вихідних даних та їхнє упорядкування, яке визначає першочерговість використання необхідних даних для проведення розрахунків за прогнозними регресійними рівняннями. Мова програмування, на якій буде написано програмне забезпечення вибирається з міркувань можливостей розробників, технічних характеристик наявної комп'ютерної техніки тощо. Розроблення програмного забезпечення є важливою складовою, оскільки його якість визначає подальші експлуатаційні можливості АСП. Зазвичай програмне забезпечення складається з декількох окремих програм, кожна з яких забезпечує роботу окремої функції АСП. Саме тому, на етапі тестування АСП важливо виявити всі недоліки та неузгодженості у програмному забезпеченні. Після цього, необхідно забезпечити можливість користування розробленою АСП гідрологами-прогнозистами, тобто розробити інструкцію зі встановлення АСП на персональний комп'ютер, а також посібник користувача. В останньому надається детальний опис усіх етапів створення прогнозної продукції і її представлення у необхідній формі.

РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

Розроблено структуру АСП, яка дозволяє виконувати довгострокове прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду за прогнозними регресійними залежностями для 36 гідрологічних постів (рис. 2).

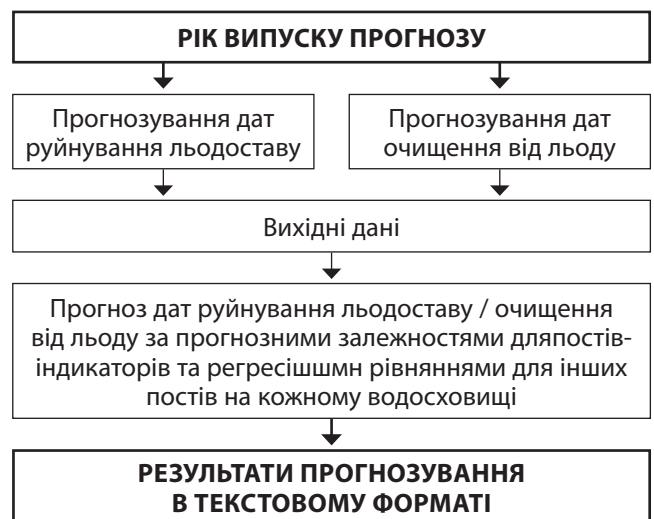


Рис. 2. Блок-схема автоматизованої системи довгострокового прогнозування (АСДП) "Ice-Spring" строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду

Програмне забезпечення АСДП "Ice-Spring" написано на мовах програмування C# та C++ у середовищі Visual Studio 2022 Community Edition у вигляді Windows форм та консольних додатків. Вибір цих мов програмування зумовлюється їхньою універсальністю і простотою використання, що дозволяє досить швидко створювати програмний код. Окрім цього, мови C# та C++ розроблені саме для створення прикладного програмного забезпечення, що і забезпечило їм широке використання у світі (Petzold, 2002; Прокопенко та ін., 2024). Отже, програмне забезпечення АСДП "Ice-Spring" виконано у формі додатку Ice-Spring.exe і має розмір 200 Мб, встановлюється на персональний комп'ютер на диск D у середовищі Windows 10 (64 біт).

Для швидкого оволодіння необхідними навичками з використання АСДП "Ice-Spring" розроблено посібник користувача, який дозволяє виконувати прогнозування послідовно (крок за кроком) від активації додатку Ice-Spring.exe до отримання результатів прогнозування. АСДП "Ice-Spring" дозволяє виконувати прогнозування строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду раз в рік, а саме 20 лютого для руйнування льодоставу та 5 березня для очищення від льоду. При цьому, необхідною умовою є наявність значень 11 телеконекційних індексів та паттернів, які є складовими прогнозних регресійних рівнянь, на сайті NOAA по січень поточного року, включно. Зазвичай, необхідна інформація на сайті з'являється вчасно, але перед початком прогнозування потребує обов'язкової перевірки.

Процес прогнозування у АСДП "Ice-Spring" розпочинається з активації додатку Ice-Spring.exe. Після його запуску на екрані монітора комп'ютера з'являється вікно під назвою Form 1 (рис. 3а). У цьому вікні гідрологу-прогнозисту необхідно вказати рік

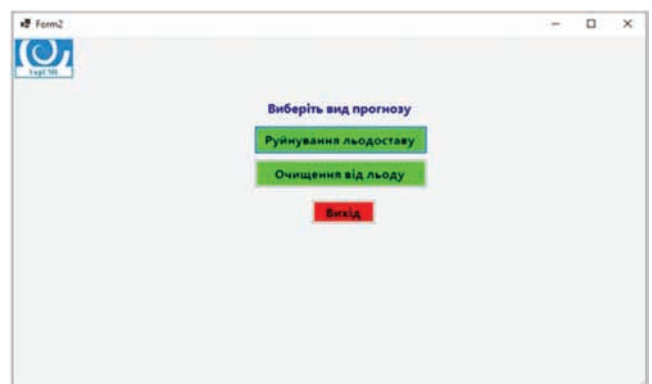
випуску прогнозу, який може перебувати у межах 2000–3000 рр. Так, якщо прогнозування відбувається 20 лютого 2021 року, тобто прогнозуються дати руйнування льодоставу на водосховищах, то необхідно просто ввести 2021. У разі введення року в іншому форматі у вікні Form 1 з'явиться повідомлення "Помилкова дата". Після цього, необхідно натиснути кнопки "Ок" або "Вихід" і відбудеться припинення роботи додатку. Надалі, необхідно запустити додаток Ice-Spring.exe ввести дату у правильному форматі. Для продовження процесу прогнозування користувачу необхідно натиснути кнопку "Ок", що дозволяє перейти до наступного вікна Form 2 (рис. 3б). Разом з цим, якщо користувачу потрібно, то він може перервати процес прогнозування натиснувши кнопку "Вихід". Така можливість закладена на кожному етапі прогнозування, тобто у всіх вікнах АСДП "Ice-Spring".

У вікні Form 2 гідролог-прогнозист може вибрати необхідний вид прогнозування натиснувши кнопки "Руйнування льодоставу" або "Очищення від льоду" і перейти у вікно Form 3 (рис. 4а). Вікно Form 3 дозволяє виконувати збір вихідних даних автоматично кросс-платформною утилітою curl.exe, яка є невід'ємною частиною додатку Ice-Spring.exe. Згідно методик, які розроблено у праці (Христюк та Горбачова, 2023) для кожного виду прогнозування відбувається автоматичне копіювання свого набору значень телеконекційних індексів та паттернів з сайту NOAA у папку d:\Ice-SPRING\Index. Це надає можливість користувачу перевірити наявність їхніх значень. У разі відсутності необхідних значень телеконекційних показників на сайті NOAA за вказаний користувачем рік АСДП "Ice-Spring" припиняє роботу.

Вікно Form 4 дозволяє безпосередньо виконати розрахунки за допомогою допоміжної програми



а



б

Рис. 3. Вікна Form 1 (а) та Form 2 (б) АСДП "Ice-Spring" строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду

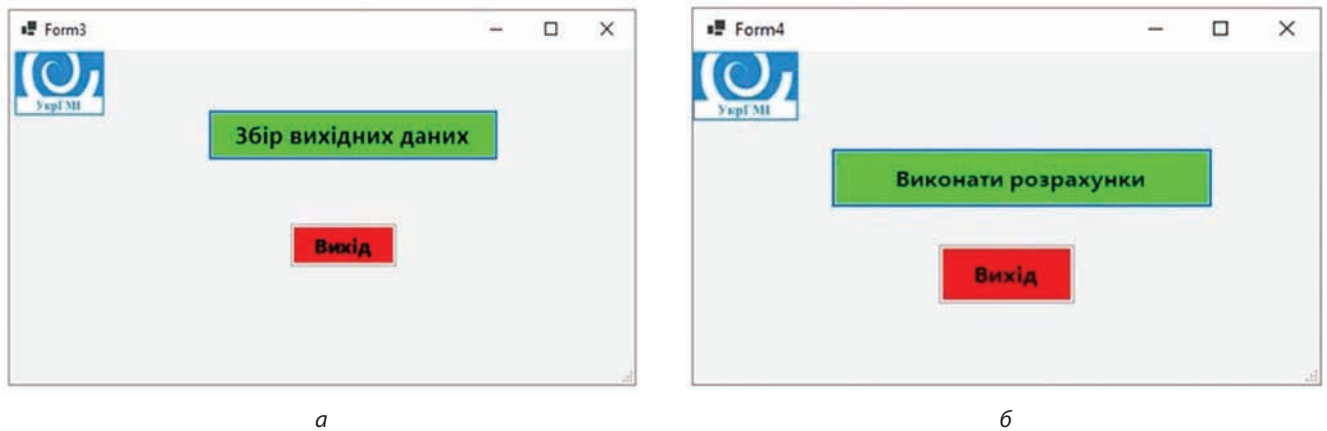


Рис. 4. Вікна Form 3 (а) та Form 4 (б) АСДП “Ice-Spring” строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду

Raschet.exe, активація якої розпочинається після натискання кнопки “Виконати розрахунки” (рис. 4б). Спочатку виконуються розрахунки згідно прогнозних регресійних рівнянь, які відображають залежність між датами руйнування льодоставу або очищення від льоду на постах-індикаторах та телеконекційними показниками. Надалі розрахунки продовжуються за регресійними рівняннями, які відображають залежність між датами руйнування льодоставу або очищення від льоду на постах-індикаторах та датами на інших постах водосховищ. У разі виконання прогнозування у високосний рік автоматично враховується наявність додаткового дня у лютому місяці. Результати розрахунків записуються до файлу “Prognoz.txt” (рис. 5).

Обраний формат файлу результатів зумовлено побажаннями гідрологів-прогнозистів УкрГМЦ, які

надають зацікавленим споживачам консультації щодо строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду. Як показано на рис. 5, файл результатів містить прогнозні дати, а також дати, які є нормами (середнє багаторічне значення) для рядів спостережень на постах-індикаторах. Це дозволяє прогнозувати виконати первинний аналіз отриманих результатів прогнозування. Отже, створене програмне забезпечення АСДП “Ice-Spring” пройшло успішне тестування і показало свою працездатність, про що свідчать результати прогнозів отримані для 2021 року, фрагмент яких наведено на рис. 5. Окрім цього, виконано оцінювання результатів прогнозування системою “Ice-Spring” дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду за незалежними даними на

| Прогноз дат руйнування льодоставу на водосховищах Дніпровського каскаду у 2021 р. | | |
|---|---|--------|
| Київське водосховище | | |
| с. Толокунь (норма - 20.III) | - | 15.III |
| р. Дніпро - с. Дніпровське | - | 15.III |
| р. Прип'ять - м. Чорнобиль | - | 04.III |
| с. Страхолісся | - | 16.III |
| с. Лебедівка | - | 16.III |
| м. Вишгород | - | 05.III |
| Канівське водосховище | | |
| смт Ржищів (норма - 13.III) | - | 05.III |
| м. Київ | - | 07.11 |
| м. Українка | - | 28.11 |
| м. Переяслав-Хмельницький | - | 10.III |
| м. Канів | - | 13.III |

Рис. 5. Фрагмент файлу “Prognoz.txt” АСДП “Ice-Spring”

Таблиця 1. **Перевірка результатів прогнозування системою “Ice-Spring” дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду за незалежними даними на прикладі 2021 року для постів-індикаторів**

| Назвапоста | Дати | | | $\delta_{\text{доп}}$ доба | Справджу- ваність |
|---|-------|-----------|-----------|-------------------------------|----------------------|
| | норма | прогнозна | історична | | |
| <i>Руйнування льодоставу</i> | | | | | |
| Вдсх Київське — с. Толокунь | 20.03 | 15.03 | 20.03 | ±13 | Так |
| Вдсх Канівське — смт Ржищів | 11.03 | 05.03 | 03.03 | ±12 | Так |
| вдсх Кременчуцьке — с. Топилівка | 17.03 | 21.02 | 20.03 | ±12 | Ні |
| Вдсх Кам'янське — с. Мишурип Ріг | 12.03 | 10.03 | 17.03 | ±11 | Так |
| Вдсх Дніпровське –Микільське-на-Дніпрі | 08.03 | 08.03 | 05.03 | ±11 | Так |
| Вдсх Каховське — с. Благовіщенка | 02.03 | 26.02 | 02.03 | ±14 | Так |
| <i>Очищення від льоду</i> | | | | | |
| Вдсх Київське — с. Толокунь | 25.03 | 20.03 | 22.03 | ±12 | Так |
| Вдсх Канівське — смт Ржищів | 20.03 | 28.02 | 17.03 | ±12 | Ні |
| Вдсх Кременчуцьке — с. Топилівка | 21.03 | 14.03 | 21.03 | ±12 | Так |
| Вдсх Кам'янське — с. Мишурип Ріг | 18.03 | 22.03 | 25.03 | ±11 | Так |
| Вдсх Дніпровське — Микільське-на-Дніпрі | 16.03 | 19.03 | 10.03 | 12 | Так |
| Вдсх Каховське — с. Благовіщенка | 14.03 | 09.03 | 03.03 | 12 | Так |

Примітка: $\delta_{\text{доп}}$ — допустима похибка прогнозу.

прикладі 2021 року за прогнозними регресійними рівняннями, які розроблено для постів-індикаторів (табл. 1).

Аналіз табл. 1 показує, що АСДП “Ice-Spring” цілком прийнятно прогнозує дати руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду. Так, з 12 прогнозів тільки 2 прогнози не справдились. Зрозуміло, що перевірка результатів прогнозування лише за даними одного року не є достатньою, оскільки ефективність прогнозування визначається статистичною обробкою накопичених рядів прогнозів (Guide to Hydrological Practices, 2009). Разом з цим, отримані результати дозволяють передати АСДП “Ice-Spring” у відділ гідрологічних прогнозів УкрГМЦ для подальшого випробування та оцінювання ефективності з метою впровадження в оперативному прогнозуванні.

ВИСНОВКИ

Сучасне прогнозування гідрологічних характеристик відбувається на основі автоматизованих комплексів та систем, які дозволяють об'єднувати і узгоджувати всі складові частини процесу прогнозування від збору вихідних даних, розрахунків і моделювання до остаточних результатів. Це значно пришвидшує і спрощує роботу гідрологів-прогнозістів та дозволяє своєчасно забезпечувати користувачів прогнозною продукцією.

Вперше розроблено і створено програмне забезпечення для автоматизованої системи довго-

строкового прогнозування “Ice-Spring”, яка дозволяє виконувати прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду на 36 гідрологічних постах. Для написання кодів програм використано мови програмування C# та C++ у середовищі VisualStudio 2022 Community Edition. Програмне забезпечення створено у вигляді Windows форм та консольних додатків. В основі системи “Ice-Spring” є методики довгострокового прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на 6 водосховищах Дніпровського каскаду. Вони містять регресійні залежності між датами руйнування льодоставу і очищення від льоду на постах-індикаторах та телеконекційними показниками, а також між датами на постах-індикаторах і датами на інших постах в межах певного водосховища. Виконане тестування системи “Ice-Spring” за даними 2021 року показало її працездатність, а перевірка ефективності прогнозування надала прийнятні результати, що дозволяє передати системи “Ice-Spring” для оперативного використання в УкрГМЦ. Розроблено посібник користувача системи “Ice-Spring”.

Описані у статті підходи по автоматизації процесу довгострокового прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду можуть бути використані для створення інших систем прогнозування, оскільки вирізняються простотою, швидкістю реалізації та зручністю використання для користувачів.

Дане дослідження виконано згідно держбюджетної теми № 1/22 "Розроблення системи довгострокового прогнозування строків руйнування льодоставу та очищення від льоду на водосховищах

Дніпровського каскаду" Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України (№ державної реєстрації 0122U002426).

ЛІТЕРАТУРА

- Бандоріна, Л.М., Климкович, Т.О., & Удачина, К.О. (2022). Основи алгоритмізації та програмування: навчальний посібник. Дніпро: УДУНТ.
- Вишневський, В.І., Сташук, В.А., & Сакевич, А.М. (2011). Водогосподарський комплекс у басейні Дніпра. Київ: Інтерпрес ЛТД.
- Водний фонд України. Штучні водойми. Водосховища і ставки. (2014). За ред. В.К. Хільчевського, В.В. Гребеня. Київ: Інтерпрес ЛТД.
- Гопченко, Є.Д., Шакірзанова, Ж.Р., Андрієвська, Г.М. (2006). Довгострокове просторове прогнозування максимального весняного стоку на основі автоматизованого комп'ютерного комплексу. *Наук. праці УкрНДГМІ*, 255, 228–240.
- Лук'янець, О.І., Сусідко, М.М. (2004). Комплексна басейнова система прогнозування паводків у Закарпатті: методична та технологічна база її складових. *Наук. праці УкрНДГМІ*, 253, 234–249.
- Маслова, Т.В., Сусідко, М.М. (2007). Оцінювання зволоженості гірських водозборів при математичному моделюванні дощових паводків. *Наук. праці УкрНДГМІ*, 256, 233–238.
- Москаленко, С.О. (2013). Прогнозування дощових паводків на річках правобережжя Прип'яті на основі моделювання процесів їх формування. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.07. Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ.
- Постанова Кабінету міністрів України (2023). Про реалізацію експериментального проекту "Будівництво Каховського гідровузла на р. Дніпро. Відбудова після руйнування Каховської ГЕС та забезпечення сталої роботи Дніпровської ГЕС у період відбудови". Постанова від 18.07.2023, № 730. Отримано 24 грудня 2024 із <https://www.kmu.gov.ua/npasearch?&num=730&category=3>
- Приймаченко, Н.В. (2010). Обґрунтування системи розрахунку характеристик паводків на гірських річках басейну Дністра на основі математичного моделювання процесів формування дощового стоку. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.07. Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ.
- Прокопенко, О.В., Попов, М.О., & Чумак, Г.Л. (2024). Мова програмування C/C++. Практикум: навчальний посібник. Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка.
- Сусідко, М.М. (2000). Математичне моделювання процесів формування стоку як основа прогностичних систем. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 1, 32–40.
- Сусідко, М.М., Щербак, А.В., Зеленська, М.В., Данильчук, В.І. (2007). Льодовий режим рівнинних річок і водосховищ України. Система короткотермінового прогнозування його характеристик. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 13, 62–84.
- Христюк, Б.Ф. (2013). Аналітично-експертна система прогнозування рівнів води судохідного Дунаю "Істер". *Наук. праці УкрНДГМІ*, 264, 72–81.
- Христюк, Б.Ф. (2023). Автоматизована система "Ice-Autumn" для довгострокового прогнозування дат появи льодових явищ та встановлення льодоставу на водосховищах Дніпровського каскаду. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 4 (70), 39–50. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.4.3>
- Христюк, Б.Ф., Горбачова Л.О. (2023). Методики довгострокового прогнозування строків руйнування льодоставу та очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду за телеконекційними показниками. *Геофізичний журнал*, 45 (6), 87–101. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i6.293309>
- Шакірзанова, Ж.Р. (2015). Довгострокове прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок та естуаріїв території України. Одеса: ТОВ "Плутон".
- Шакірзанова, Ж.Р., Перевозчиков, І.М., Шевченко, О.П. (2023). Застосування методу територіальних довгострокових прогнозів для визначення максимальних витрат води в умовах формування весняного водопілля 2022–2023 року в басейні р. Десна. *Український гідрометеорологічний журнал*, 31, 5–21. <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.023.01>
- Чорноморець, Ю.О., Перевозчиков, І.М., Орещенко, А.В., Мала, Л.М. (2023). Визначення стокових характеристик нижнього Дніпра з урахуванням підриву дамби Каховської ГЕС. *Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля*, 2 (4), 51–61. <http://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.051>
- Guide to Hydrological Practices (2009). Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. Vol. II. Sixth edition. WMO-No. 168. Geneva: World Meteorological Organization.
- Khrystyuk, B. (2017). Short-term forecasting of water inflow to Dniester reservoir using numerical weather forecast model data. In: P. Ninov, E. Bojilova (Eds.), XXVII Conference of the Danubian countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management (26–28 September 2017, Golden Sands, Bulgaria), (p. 44).
- Khrystiuk, B., Gorbachova, L., Shpyg, V. (2022). Verification of the automated flood forecasting system on the Stryi River. *Acta Hydrologica Slovaca*, 23 (2), 234–240. <https://doi.org/10.31577/ahs-2022-0023.02.0026>
- Krajewski, W.F., Ceynar, D., Demir, I., Goska, R., Kruger, A., Langel, C., Mantilla, R., Niemeier, J., Quintero, F., Seo, B.-C., Small, S.J., Weber, L.J., Young N.C. (2017). Real-Time Flood Forecasting and Information System for the State of Iowa. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98 (3), 539–554. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00243.1>
- Lewis, E., Birkinshaw, S., Kilsby, C., Fowler, H.J. (2018). Development of a system for automated setup of a physically-based, spatially-distributed hydrological model for catchments in Great Britain. *Environmental Modelling & Software*, 108, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.07.006>
- Loi, N.K., Liem, N.D., Tu, L.H., Hong, N.T., Truong, C.D., Tram, V.N.Q., Nhat, T.T., Anh, T.N., Jeong, J. (2019). Automated procedure of real-time flood forecasting in Vu Gia — Thu Bon River basin, Vietnam by integrating SWAT and HEC-RAS models. *Journal of Water and Climate Change*, 10 (3), 535–545. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.015>

- Petzold, C. (2002). Programming Microsoft Windows with C#. Microsoft Press.
- Škerjanec, M. (2022). Automated catchment scale modelling of hydrological phenomena and water quality. *Acta hydro-technica*, 35/62, 1–18. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2022.01>

REFERENCES

- Bandorina, L.M., Klymkovich, T.O., & Udachyna, K.O. (2022). Fundamentals of algorithmization and programming: a textbook. Dnipro: UDUNT. [in Ukrainian]
- Chornomorets, Y.O., Perevozchikov, I.M., Oreshchenko, A.V., & Mala, L.M. (2023). Determination of flow characteristics of the lower Dnipro taking into account the explosion of Kahovka HPP. *Meteorology. Hydrology. Environmental monitoring*, 2 (4), 51–61. <http://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.051> [in Ukrainian]
- Gopchenko, E.D., Shakirzanova, Z.R., & Andriyevska, G.M. (2006). Long-term spatial forecasting of maximum spring flow based on an automated computer complex. *Nauk. pratsi UkrNDGMI*, 255, 228–240. [in Ukrainian]
- Guide to Hydrological Practices (2009). Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. Vol. II. Sixth edition. WMO-No. 168. Geneva: World Meteorological Organization.
- Khrystyuk, B.Ф. (2013). The analytical and expert system for the forecasting of the water levels of the navigable part of Danube "Ister". *Nauk. pratsi UkrNDGMI*, 264, 72–81. [in Ukrainian]
- Khrystyuk, B. (2017). Short-term forecasting of water inflow to Dniester reservoir using numerical weather forecast model data. In: P. Ninov, E. Bojilova (Eds.), XXVII Conference of the Danubian countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management (26–28 September 2017, Golden Sands, Bulgaria), (p. 44).
- Khrystiuk, B.F. (2023). Automated "Ice-Autumn" system for long-term forecasting of appearance dates of ice phenomena and freeze-up at the Dnipro Cascade reservoirs. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 4 (70), 39–50. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.4.3> [in Ukrainian]
- Khrystiuk, B.F., & Gorbachova, L.O. (2023). Long-term forecasting methods of dates of ice break-up and disappearance at the Dnipro Cascade Reservoirs by teleconnection indicators. *Geophysical Journal*, 45 (6), 87–101. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i6.293309> [in Ukrainian]
- Khrystiuk, B., Gorbachova, L., & Shpyg, V. (2022). Verification of the automated flood forecasting system on the Stryi River. *Acta Hydrologica Slovaca*, 23 (2), 234–240. <https://doi.org/10.31577/ahs-2022-0023.02.0026>
- Krajewski, W.F., Ceynar, D., Demir, I., Goska, R., Kruger, A., Langel, C., Mantilla, R., Niemeier, J., Quintero, F., Seo, B.-C., Small, S.J., Weber, L.J., & Young N.C. (2017). Real-Time Flood Forecasting and Information System for the State of Iowa. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98 (3), 539–554. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00243.1>
- Lewis, E., Birkinshaw, S., Kilsby, C., & Fowler, H.J. (2018). Development of a system for automated setup of a physically-based, spatially-distributed hydrological model for catchments in Great Britain. *Environmental Modelling & Software*, 108, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.07.006>
- Loi, N.K., Liem, N.D., Tu, L.H., Hong, N.T., Truong, C.D., Tram, V.N.Q., Nhat, T.T., Anh, T.N., & Jeong, J. (2019). Automated procedure of real-time flood forecasting in Vu Gia — Thu Bon River basin, Vietnam by integrating SWAT and HEC-RAS models. *Journal of Water and Climate Change*, 10 (3), 535–545. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.015>
- Lukyanets, O.I., & Susidko, M.M. (2004). Integrated basin flood forecasting system in Transcarpathia: methodological and technological basis of its components. *Nauk. pratsi UkrNDGMI*, 253, 234–249. [in Ukrainian]
- Maslova, T.V., & Susidko, M.M. (2007). Estimating the humidity of mountain catchments in mathematical modeling of rain floods. *Nauk. pratsi UkrNDGMI*, 256, 233–238. [in Ukrainian]
- Moskalenko, S.O. (2013). Forecasting rain floods on the rivers of right bank of the Pripjat based on modeling of their formation processes. *Avtoref. dys. ... kand. geogr. nauk*: 11.00.07. Taras Shevchenko National University of Kyiv. [in Ukrainian]
- Petzold, C. (2002). Programming Microsoft Windows with C#. Microsoft Press.
- Prokopenko, O.V., Popov, M.O., & Chumak, H.L. (2024). Programming language C/C++. Workshop: a textbook. Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv. [in Ukrainian]
- Pryimachenko, N.V. (2010). Substantiation of the system for calculating flood characteristics on mountain rivers of the Dniester basin based on mathematical modeling of rain runoff formation processes. *Avtoref. dys. ... kand. geogr. nauk*: 11.00.07. Taras Shevchenko National University of Kyiv. [in Ukrainian]
- Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine. (2023). On the Implementation of the Pilot Project "Construction of the Kakhovka Hydroelectric Power Station on the Dnipro River. Reconstruction after the destruction of the Kakhovka HPP and ensuring the sustainable operation of the Dnipro HPP during the reconstruction period". The Cabinet of Ministers of Ukraine. 18.07.2023. № 730. Retrieved December 24, 2024 from <https://www.kmu.gov.ua/npasearch?&num=730&category=3> [in Ukrainian]
- Shakirzanova, Z.R. (2015). Long-term forecasting of the characteristics of the maximum spring flow of plain rivers and estuaries in Ukraine. Odesa: TOV "Plyton". [in Ukrainian]
- Shakirzanova, Z.R., Perevozchikov, I.M., & Shevchenko, O.P. (2023). Application of the method of territorial long-term forecasts to determine the maximum water discharge rates under the conditions of spring flood 2022–2023 formation across the Desna basin. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 31, 5–21. <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.01> [in Ukrainian]
- Škerjanec, M. (2022). Automated catchment scale modelling of hydrological phenomena and water quality. *Acta hydro-technica*, 35/62, 1–18. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2022.01>
- Susidko, M.M. (2000). Mathematical modeling of runoff formation processes as a basis of forecasting systems. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 1, 32–40. [in Ukrainian]
- Susidko, M.M., Sherbak, A.V., Zelenska, M.V., & Danylchuk, V.I. (2007). Ice regime of plain rivers and reservoirs of Ukraine. System of short-term forecasting of its characteristics. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 13, 62–84. [in Ukrainian]
- Vishnevsky, V.I., Stashuk, V.A., & Sakevych, A.M. (2011). Water management complex in the Dnieper basin. Kyiv: InterpresLTD. [in Ukrainian]
- Water Fund of Ukraine. Artificial reservoirs. Reservoirs and ponds. (2014). In: V.K. Khilchevskiy, V.V. Grebin. Kyiv: InterpresLTD. [in Ukrainian]

Borys Khrystiuk

ORCID:0000-0003-4290-3745

khryst@uhmi.org.ua

Ukrainian Hydrometeorological Institute
of the State Emergency Service of Ukraine
and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

PROCESS AUTOMATION OF THE LONG-TERM FORECASTING OF ICE BREAK-UP AND ICE DISAPPEARANCE DATES AT THE DNIPRO RESERVOIRS

The article is devoted to the creation of an automated system "Ice-Spring" for long-term forecasting of dates of ice break-up and ice disappearance at the Dnipro Cascade reservoirs by writing a computer program for its further use in the operative work of the Ukrainian Hydrometeorological Center of the State Emergency Service of Ukraine (UkrHMC). To automate the forecasting process, the "Ice-Spring" system software was created, which is written in the C# and C++ programming languages in the Visual Studio 2022 Community Edition environment in the view of Windows forms and console applications. The "Ice-Spring" system allows for long-term forecasting of the dates of

ice break-up (February 20) and ice disappearance (March 5) at the Dnipro Cascade reservoirs at 36 water gauges each year. Forecasting is carried out using 12 forecast dependencies based on regression relationships between dates on indicator water gauges and teleconnection indicators. In this case, the mean monthly values of 11 teleconnection indicators are used, which affect the processes of ice break-up and ice disappearance at the Dnipro Cascade reservoirs, which are determined by the National Weather Service (NWS) of the National Oceanic & Atmospheric Administration USA (NOAA). Forecasting on other water gauges is carried out using 60 regression dependencies between the dates at these gauges and the dates at the indicator water gauges. The created software for the automated long-term forecasting system "Ice-Spring" has successfully passed testing and has shown its performance for independent data for 2021. At the same time, carried out evaluation of forecasting efficiency has shown acceptable results, since of 12 forecasts, only 2 forecasts did not come true. The "Ice-Spring" system was transferred to the UkrHMC for testing and operative use.

Keywords: long-term forecasting, ice break-up, ice destruction, Dnipro reservoirs, prognostic dependencies, automated system.



В.А. Жежеря^{1*},

ORCID: 0000-0002-1128-5270
zhezheryava1981@gmail.com

Т.П. Жежеря²

ORCID: 0009-0007-2394-7271
tanyadyka@ukr.net

П.М. Линник¹

ORCID 0000-0002-2144-4052
e-mail: peter-linnik@ukr.net

В.П. Осипенко¹

ORCID 0009-0006-3100-4655
e-mail: vosypenko@ukr.net

УДК 556.114:556.5(28)

DOI: <https://doi.org/10.15407/Meteorology2024.06.059>

ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОХІМІЧНОГО РЕЖИМУ АНТРОПОГЕННО ЗМІНЕНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

У статті розглянуто особливості гідрохімічного режиму водних об'єктів, які знаходяться в межах урбанізованої території. Встановлено, що взимку і навесні мінералізація води і вміст головних йонів зазнає найбільших змін у водних об'єктах, до яких надходять зливові води з хімічними засобами проти ожеледиці. Це призводить до зростання величин мінералізації води у цілому і концентрації хлоридів, сульфатів, йонів натрію і магнію зокрема. У місцях локального забруднення водних об'єктів простежується збільшення концентрації неорганічних сполук азоту і фосфору, органічних речовин і металів. У водних об'єктах, які зазнають істотного антропогенного впливу, переважає неорганічна форма азоту і фосфору, частка якої досягає > 50% їхнього загального вмісту. Для антропогенно змінених водних об'єктів характерне зростання концентрації розчинених органічних речовин за рахунок збільшення частки вуглеводів та інших не ідентифікованих груп органічних сполук, тоді як частка гумусових речовин зменшується. Помітне збільшення частки вуглеводів відбувається зазвичай влітку і восени за умов "цвітіння" води і відмирання фітопланктону та вищих водних рослин. Антропогенне забруднення водних об'єктів стає причиною зростання частки лабільної фракції металів, яка потенційно біодоступна та токсична для гідробіоти. Зазначена фракція перевищує 50% їхньої концентрації у розчиненому стані. Збільшення мінералізації води, вмісту біогенних і органічних речовин та лабільної фракції металів простежується також у придонному горизонті водойм під час прямої і зворотної температурної стратифікації через їхнє надходження з донних відкладів. Цьому сприяє передусім дефіцит розчиненого кисню, зниження величин Eh-потенціалу та збільшення температури води. Вторинне забруднення води біогенними речовинами слід розглядати як важливе внутрішнє джерело посилення евтрофування водойм. В результаті водне середовище стає непридатним для життєдіяльності багатьох оксифільних гідробіонтів. В умовах потепління клімату зазначені процеси посилюватимуться. Тому важливим стає розроблення низки заходів, які б унеможливили або мінімізували як зовнішнє, так і внутрішнє надходження поживних речовин до поверхневих водних об'єктів.

Ключові слова: мінералізація води, головні йони, біогенні речовини, органічні речовини, метали, водні об'єкти, урбанізована територія.

ВСТУП

Широке використання водних об'єктів у різних галузях народного господарства неминує позначається як на хімічному складі води, так і на її якості. Поверхневі води — це складні багатокомпонентні системи зі змінним хімічним складом, оскільки останній зазнає сезонних і просторових змін. У водних об'єктах урбанізованої території ці зміни стають помітнішими через надходження до них тих чи інших хімічних сполук, що призводить до порушення усталеної хімічної рівноваги. Зазвичай, антропогенно змінені водні об'єкти зазнають забруднення хлоридами, сульфатами, йонами натрію і магнію, неорганічними сполуками азоту і фосфору, розчиненими органічними речовинами (РОР), серед яких слід ви-

окремити нафтопродукти і синтетичні поверхнево активні речовини (СПАР), деякі специфічні органічні речовини (пестициди, гербіциди, барвники тощо), а також сполуками металів. Останні за певних концентрацій проявляють токсичний вплив на гідробіонтів, якщо знаходяться у біодоступній формі, а саме у вигляді аква- і гідросококомплексів, комплексів з неорганічними лігандами. Певна частина металів може бути також потенційно біодоступною, якщо вона знаходиться у складі комплексних сполук з РОР, молекулярна маса яких не перевищує 5 кДа (Linnik et al., 2018; Rubini et al., 2002).

Наприкінці ХХ ст. частка річок світу, в яких хімічний склад води зазнав істотних змін, перевищувала 90%. Встановлено, що вміст сполук азоту і фосфору

у поверхневих водах Європи та Північної Америки збільшився майже у 20 разів порівняно з фоновими концентраціями (Heathwaite et al., 1996). Прогнозується, що за подальшого зростання населення світу чисельність міського населення збільшиться на 2,5 млрд. до 2050 р. (Trottet et al., 2021). Наслідком цього стане зростання забруднення поверхневих вод біогенними сполуками і POP.

У поверхневих водах хімічні сполуки, які надходять з водозбору, зазнають перерозподілу між абіотичними і біотичними компонентами, а також трансформації їхніх співіснуючих форм. При надходженні тих чи інших сполук хімічного елемента, певна їхня частина асимілюється гідробіонтами або знаходиться у розчиненому чи завислому стані, а інша депонується у складі донних відкладів. Останнє призводить до тимчасового вилучення хімічних елементів із водного середовища. Однак, у водних об'єктах може відбуватися зворотній процес, коли донні відклади стають джерелом вторинного забруднення води різноманітними хімічними речовинами. Зазначене забруднення посилюється за дефіциту розчиненого кисню, зниження величин рН і окисно-відновного потенціалу (Еh-потенціалу), зростання мінералізації води тощо (Денисова и др., 1987; Денисова и др., 1989; Линник та Морозова, 2006; Wu et al., 2013; Nazari-Sharabian et al., 2018; Kowalczevska-Madura et al., 2018). Таким чином, поверхневі водні об'єкти урбанізованих територій можна вважати найбільш уразливими до антропогенного впливу, що позначається на їхньому гідрохімічному режимі, який, у свою чергу, забезпечує умови життєздатності та функціонування гідробіонтів.

За постійного антропогенного впливу поверхневі водні об'єкти у межах населених пунктів зазнають евтрофування, яке, порівняно із природним повільним процесом протягом 200–300 років, пришвидшується в рази і може проявлятися через декілька років. До наслідків евтрофування водоем відносять дефіцит розчиненого кисню, зростання концентрації сполук азоту і фосфору, збільшення вмісту завислих речовин органічного походження (фітопланктон, детрит), зростання частки органічних речовин автохтонного походження, домінування представників синьозелених і зелених водоростей, зростання біомаси бентосних та епіфітних водоростей, зміну видового складу та біомаси макрофітів, збільшення каламутності води, зростання вмісту амонійного азоту і неорганічних сполук фосфору у донних відкладах, замори, втрату рекреаційних властивостей (Sellers & Markland, 1987; Carpenter et al., 1998; Rathorel et al., 2016). До певних особливостей водних об'єктів, які знаходяться у межах населених пунктів, слід віднести більш виражене пікове

надходження зливних або скидних стічних вод, порушення природного біорізноманіття (Vermond et al., 2009).

Мета наших досліджень полягала у вивченні та узагальненні особливостей змін хімічного складу води поверхневих водних об'єктів у межах урбанізованої території.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження хімічного складу поверхневих водних об'єктів у межах урбанізованих територій м. Києва і міської агломерації Буча, Ірпінь, Гостомель проводились протягом 2008–2024 рр. Дослідженнями було охоплено наступні водні об'єкти: річки Либідь (2014 р.) і Сирець (2015–2016 рр., 2021–2022 р.) (м. Київ), Буча, Рокач, Ірпінь (2022–2024 рр.) (міська агломерація Буча, Ірпінь, Гостомель), озера системи Опечень (2015–2016 рр., 2021–2022 рр.), Вербне (2008–2010 рр., 2012р., 2017–2019 рр.), Тельбін (2008–2010 рр.), Китаївські ставки (2014 р.), водойми острова Галерний (2023 р.) (м. Київ). Для порівняння із умовно чистими водними об'єктами, використовували результати досліджень води Київського водосховища (2009–2010 рр.), Канівського водосховища (верхня ділянка в межах м. Києва, 2009–2013 рр., 2016.), річок басейну Прип'яті (2010, 2012–2013 рр.). Нижче наведено карти-схеми водних об'єктів міської агломерації Буча, Ірпінь і Гостомель та озер системи Опечень, на яких дослідження проводились тривалий проміжок часу (рис. 1).

Проби води відбирали з поверхневого і придонного горизонтів, а також за вертикаллю через кожні 1–2 м за допомогою модифікованого батометра-склянки. Для їхнього транспортування і зберігання використовували поліпропіленові ємності. Завислі речовини відокремлювали за допомогою мембранної фільтрації. Для цього пробу води об'ємом 1,0–1,5 дм³ пропускали через нітроцелюлозний мембранний фільтр "Fioroni" (КНР) з діаметром пор 0,45 мкм під тиском (~2 атм), який створювався за допомогою установки УК 40-2М. Безпосередньо на місці відбору проб вимірювали температуру води, визначали рН та вміст розчиненого кисню за допомогою мультифункціонального приладу AZ-86031 (КНР). Коректність результатів вимірювання концентрації O₂ зазначеним приладом контролювали методом Вінклера (Набиванець та ін., 2007). Величини Еh-потенціалу вимірювали за допомогою мультифункціонального приладу Ezodo 7200 (Тайвань).

Твердість води і вміст головних іонів визначали у фільтратах води. Концентрацію іонів Na⁺, K⁺, Ca²⁺ і Cl⁻ визначали за допомогою іономіра Al-125 (ТОВ "ВП Діліс", Україна) із використанням відповід-

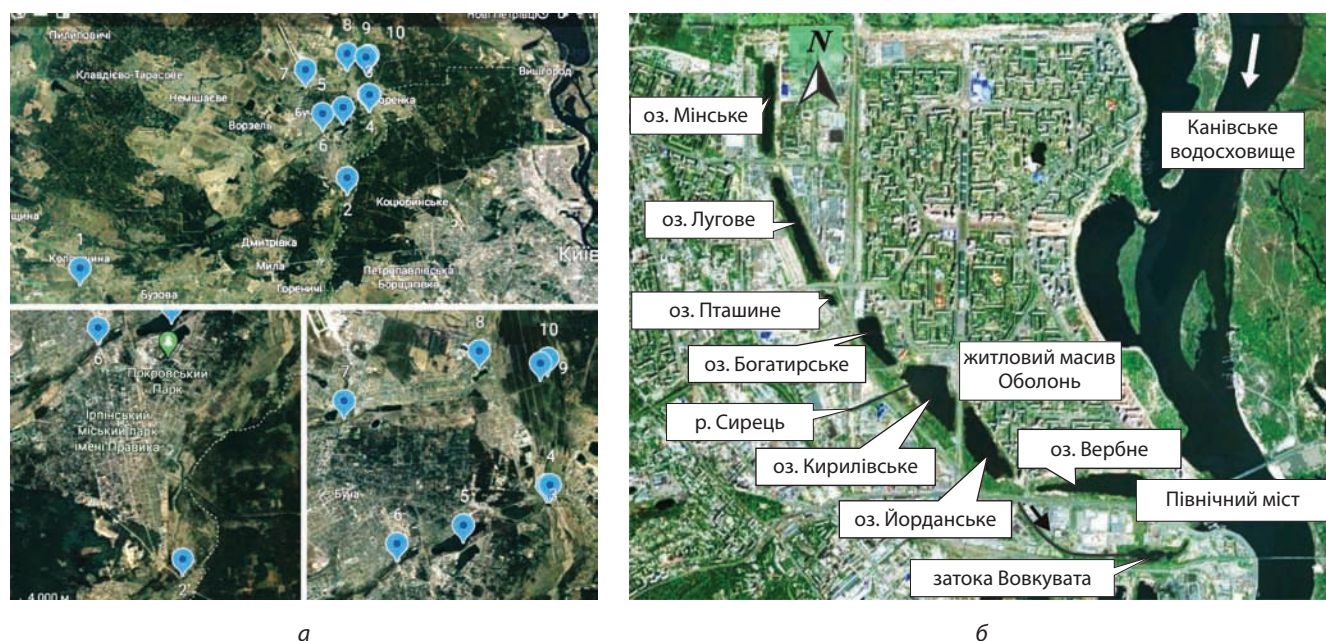


Рис. 1. Карта-схема станцій відбору проб води на водних об'єктах поза та в межах міської агломерації Буча, Ірпінь і Гостомель (а) та озер системи Опечень (б); а: 1 — р. Буча біля с. Северинівки; 2 — р. Ірпінь, автомобіст в м. Ірпінь; 3 — гирло р. Бучі; 4 — місце впадіння р. Бучі в р. Ірпінь; 5 — ставок на р. Бучі, м. Буча; 6 — р. Буча, вул. Вокзальна, 7 — р. Рокач, вул. Вокзальна; 8 — ставок біля Гостомельської міської ради; 9 — гирло р. Рокач; 10 — р. Ірпінь, нижче впадіння р. Рокач

но скляного натрій-селективного електрода ЕЛІС-112Na, калій-селективного електрода ЕЛІС-121K з ПВХ мембраною, кальцій-селективного електрода ЕЛІС-121Ca з ПВХ мембраною і хлорид-селективного електрода ЕМ-СІ-01. Вміст йонів Mg^{2+} розраховували, беручи до уваги величину твердості води і концентрацію йонів Ca^{2+} . Твердість води визначали титриметричним методом з використанням етилендіамінтетраоцтової кислоти (ЕДТА) і індикатора еріохрому чорного (Набиванець та ін., 2007). Концентрацію CO_3^{2-} і HCO_3^- йонів встановлювали шляхом прямого титрування проб води розчином HCl (0,02 або 0,05 моль/дм³) до величини рН 4,0 (Набиванець та ін., 2007). Вміст йонів SO_4^{2-} визначали турбідиметричним методом у вигляді сірчаноокислого барію у солянокислому середовищі з використанням гліколевого реагенту (Набиванець та ін., 2007).

Хімічне споживання кисню (ХСК) з використанням різних окисників $KMnO_4$ (ХСК_{Mn}) та $K_2Cr_2O_7$ (ХСК_{Cr}) визначали за загальновідомими методиками (Набиванець та ін., 2007; Руководство по химическому анализу..., 1977). Вміст розчиненого карбону органічних сполук ($C_{орг}$) розраховували за формулою $C_{орг}=0,375 \times ХСК_{Cr}$ (Руководство по химическому анализу..., 1977).

Для розділення РОР за хімічною природою застосовували метод йонообмінної хроматографії з використанням колонок, заповнених йонообмінними целюлозами — ДЕАЕ (діетиламіноетилцелюлоза) і КМ (карбоксиметилцелюлоза) виробництва фірми

“SERVA”. Гумусові речовини (ГР), які належать до РОР кислотної групи, вилучали адсорбцією на колонці з ДЕАЕ-целюлозою, а білковоподібні речовини (БПР) як речовини основної групи — на колонці з КМ-целюлозою. Нейтральну групу РОР, у якій переважають вуглеводи, отримували після послідовного пропускання фільтрату природної води через вище зазначені колонки з целюлозними йонітами (Linnik et al., 2013). Вміст ГР у складі кислотної групи визначали за градувальним графіком “Кольоровість води, °Cr-Со-шкали — концентрація ГР, мг/дм³”. Кольоровість води як непряму характеристику вмісту ГР у воді поверхневих водних об'єктів вимірювали за допомогою імітаційної дихроматно-кобальтової шкали (Набиванець та ін., 2007). Для побудови градувального графіка використовували препарати фульвокислот і гумінових кислот, які були отримані з води Канівського водосховища і очищені з використанням катіонообмінника КУ-23 в Н-формі, а потім висушені до постійної маси. Визначення речовин білкової природи здійснювали за реакцією Лоурі (Дебейко и др., 1973; Lowry et al., 1951), а вуглеводів — за допомогою антрону (Руководство по химическому анализу..., 1977).

Вміст неорганічних сполук азоту і фосфору та розчинного силіцію у фільтратах природної води знаходили фотометричним методом. Концентрацію амонійної, нітритної та нітратної форм азоту визначали відповідно за методиками з використанням сегнетової солі та реактиву Несслера, реактиву Грісса

і саліцилату натрію, неорганічні сполуки фосфору — молібдату амонію у сильнокислому середовищі (рН 0,80–0,95) за наявності аскорбінової кислоти як відновника, а силіцію — у вигляді синьої (відновленої) форми силіціймолібденової гетерополікислоти із використанням метол-сульфітної суміші (Набиванець та ін., 2007).

Для дослідження співіснуючих форм металів у розчиненому стані використовували певну послідовність дій, яка описується нижче. Спочатку необхідно профільтрувати пробу води з використанням мембранного фільтра 0,45 мкм для відокремлення завислих речовин, що бажано виконувати на місці відбору проб. Отриманий фільтрат води ділять на дві частини, одну з яких відразу після фільтрації підкислюють розбавленим розчином 1:2 нітратної кислоти (HNO_3^-) до рН $\sim 3,5\text{--}4,0$, а іншу залишають без змін, тобто як нативну воду з відповідним значенням рН. Наступний етап полягає у визначенні концентрації досліджуваного металу в обох фільтратах води до та після фотохімічної деструкції РОР. Концентрація металу, яка визначається у фільтраті з рН нативної води до фотохімічної деструкції РОР, відповідає його вмісту у складі слабо стійких комплексів з РОР, із яких він вилучається відповідними фотометричними реагентами та утворює з ними комплекси, а також аква- й гідроксокомплексів та комплексів із неорганічними лігандами, які не встигли адсорбуватися або трансформуватися в комплекси з РОР ($\text{Me}_{\text{лаб}}$). Концентрація металу, яка визначається у не підкисленому фільтраті води після фотохімічної деструкції відповідає його вмісту у розчиненому стані без урахування тієї частини металу, яка могла адсорбуватися під час транспортування та зберігання проби ($\text{Me}_{\text{розч}}$). Концентрація досліджуваного металу, яка визначається у підкисленому фільтраті води до фотохімічної деструкції РОР, відповідає сумі концентрацій його аква-, гідроксокомплексів, комплексів із неорганічними лігандами і частково з органічними лігандами ($\text{Me}_{\text{в+лаб}}$). Після фотохімічної деструкції РОР у підкисленому фільтраті визначається загальний вміст металу у розчиненій формі ($\text{Me}_{\text{заг.розч}}$). Вміст вільних гідратованих йонів визначали за формулою: $\text{Me}_{\text{в}} = \text{Me}_{\text{в+лаб}} - \text{Me}_{\text{лаб}}$ або $\text{Me}_{\text{в}} = \text{Me}_{\text{заг.розч}} - \text{Me}_{\text{розч}}$. Вміст металу у складі стійких комплексів з РОР ($\text{Me}_{\text{компл}}$), розраховується за формулою: $\text{Me}_{\text{компл}} = \text{Me}_{\text{заг.розч}} - \text{Me}_{\text{в+лаб}}$. Зазначені розрахунки можуть бути застосовані, передусім, при фотометричному визначенні металу для встановлення вмісту аква- й гідроксокомплексів та комплексів з неорганічними лігандами ($\text{Me}_{\text{в}}$). При використанні хемілюмінесцентного методу й анодної інверсійної вольтамперометрії концентрація останніх визначається безпосередньо у фільтраті

зі значенням рН нативної води до фотохімічної деструкції. Однак, за допомогою цих розрахунків при використанні вище зазначених методів можна встановити втрати аква- і гідроксокомплексів досліджуваних металів за час зберігання фільтратів води.

Для фотохімічного окиснення органічних речовин у кварцові склянки об'ємом 50 см^3 вносили $30\text{--}40 \text{ см}^3$ фільтрованої води, а потім додавали по 3–5 крапель концентрованої H_2SO_4 градації "х.ч." і 3–5 крапель 30%-ного розчину H_2O_2 . Опромінювання вмісту склянок здійснювали за допомогою ртутно-кварцової лампи ДРТ-1000 протягом 2,0–2,5 годин.

Концентрацію алюмінію і феруму визначали фотометричним методом з використанням відповідно хромазурулу S і о-фенантроліну (Набиванець та ін., 2007; Савранский и Наджафова, 1992), купруму, мангану і хрому — хемілюмінесцентним методом (Набиванець та др., 1981; Linnik, 2003; Linnik et al., 1989), цинку, кадмію і плюмбуму — методом анодної інверсійної вольтамперометрії (Линник и Набиванець, 1988; Linnik & Iskra, 1994).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Мінералізація та йонний склад води. Мінералізація води належить до найбільш сталих гідрохімічних показників. Мінімальні її величини зазвичай спостерігаються навесні під час водопілля. Деяке зниження мінералізації води може бути після злив (Osadchy et al., 2016). У межах урбанізованих територій зміна величин мінералізації води має певні свої особливості. Наприклад, в озерах системи Опечень мінералізація води протягом 2021 р. змінювалась у середньому в межах 330–464 і 511–720 мг/дм^3 відповідно у поверхневому і придонному горизонтах, досягаючи максимальних величин взимку і навесні. Зниження її величин відбувалось, починаючи з літа і до осені внаслідок розбавлення води цих озер дощовими водами. У поряд розташованому Канівському водосховищі мінералізація води становила 248–424 мг/дм^3 , складаючи у середньому 323 мг/дм^3 . Зростання мінералізації води взимку і особливо навесні зумовлене додатковим надходженням йонів Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- і SO_4^{2-} через використання солей проти обледеніння доріг, а у випадку йонів Mg^{2+} і SO_4^{2-} також за рахунок переважання ґрунтового живлення. Концентрація зазначених йонів зростала приблизно у 3–5 разів порівняно з фоновими величинами, досягаючи відповідно 92–164, 38–53, 91–186 і 101–247 мг/дм^3 . У воді Канівського водосховища їхній вміст значно нижчий і становить у середньому 14,8, 14,4, 24,1 і 36,8 мг/дм^3 . Встановлено, що у воді Канівського водосховища нижче м. Києва у 2015 р. концентрація

йонів Cl^- і Na^+ зростала, внаслідок застосування засобів проти ожеледиці, відповідно на 2–6 та 2–5 мг/дм^3 (Розроблення плану управління...). Збільшення вмісту йонів Cl^- і Na^+ у воді зазначеного водосховища незрівнянно нижче, оскільки повний об'єм Канівського водосховища становить 2,5 км^3 , а озер системи Опечень загалом — лише 0,004 км^3 . Таким чином, малі водні об'єкти урбанізованих територій більш уразливі до забруднення солями при їхньому застосуванні як засобів проти ожеледиці. Підвищені концентрації зазначених йонів призводять не лише до зростання мінералізації води, а також до значної трансформації йонного складу води верхніх чотирьох озер (Мінське, Лугове, Пташине і Андріївське). Взимку і навесні вода в них належала до хлоридного, гідрокарбонатно-хлоридного або сульфатно-хлоридного класу, групи натрію, натрію і магнію або кальцію і натрію, II типу ($\text{Cl}_{\text{II}}^{\text{Na}}$, $\text{CCl}_{\text{II}}^{\text{Na,Mg}}$, $\text{CCl}_{\text{II}}^{\text{Ca,Na}}$, $\text{SCl}_{\text{II}}^{\text{Na,Mg}}$), а влітку і восени — до гідрокарбонатно-хлоридного, гідрокарбонатного класу, групи кальцію, кальцію і натрію чи кальцію і магнію, II або III типу ($\text{CCl}_{\text{II}}^{\text{Na,Ca}}$, $\text{C}_{\text{II}}^{\text{Ca,Na}}$, $\text{C}_{\text{II}}^{\text{Ca}}$, $\text{C}_{\text{III}}^{\text{Ca}}$, $\text{C}_{\text{III}}^{\text{Ca,Mg}}$). У Кирилівському і Йорданському озерах взимку і навесні вода належала до гідрокарбонатного і сульфатно-гідрокарбонатного класу, групи кальцію, магнію і кальцію чи магнію і натрію, II або III типу ($\text{C}_{\text{II}}^{\text{Ca}}$, $\text{C}_{\text{III}}^{\text{Ca}}$, $\text{C}_{\text{III}}^{\text{Mg,Ca}}$, $\text{SC}_{\text{III}}^{\text{Mg,Na}}$, $\text{SC}_{\text{III}}^{\text{Ca}}$), а влітку і восени — до гідрокарбонатного класу, групи кальцію, третього типу ($\text{C}_{\text{III}}^{\text{Ca}}$). У Канівському водосховищі вода не зазнала трансформації йонного складу і належала до гідрокарбонатного класу, групи кальцію, другого типу ($\text{C}_{\text{II}}^{\text{Ca}}$) (Linnik & Zhezherya, 2022).

Мінералізація води у річках Ірпінь, Буча та Рокач протягом 2022–2024 рр. змінювалася в межах відповідно 370–466, 331–581 і 351–474 мг/дм^3 . Максимальні її зміни ($\approx 240 \text{ мг/дм}^3$) спостерігались в р. Буча в межах урбанізованої території, дещо менші коливання простежуються у річках Ірпінь і Рокач — відповідно 56–73 і 70–123 мг/дм^3 .

До яскравого прикладу впливу зливових вод на мінералізацію води слід віднести водойми острова Галерний (м. Київ). У вересні 2023 р. серед водойм цього острова мінералізація води зазнавала найбільших змін в озерах Миколайчик і Єрик — відповідно 268–491 і 267–473 мг/дм^3 . Натомість мінералізація води в Галерній затоці і двох водоймах без назв (б/н-1 і б/н-2), до яких не потрапляє вода з колекторів, становила відповідно 180–195 мг/дм^3 , 206–208 і 180–185 мг/дм^3 . Серед головних йонів найбільших змін зазнав вміст хлорид-йонів, концентрація яких у північній частині озер Миколайчик і Єрик становила 180–265 мг/дм^3 , а в Галерній затоці і в б/н-1 і б/н-2 вона не перевищувала відповідно 20,4, 22,2 і 10,2 мг/дм^3 . Мінералізація води і кон-

центрація хлорид-йонів у воді з колекторів у грудні 2023 р. знаходилась в межах відповідно 2230–7500 мг/дм^3 і 756–3839 мг/дм^3 .

Таким чином, у невеликих водних об'єктах у межах населених пунктів зафіксовано зростання мінералізації води і зміну йонного складу через збільшення вмісту йонів Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- і SO_4^{2-} , які надходять з водозбору зі зливовими і стічними водами.

Біогенні сполуки. Вміст біогенних речовин у водних об'єктах урбанізованих територій зазнає найбільших змін, що пов'язано, з одного боку, з їхнім надходженням зі стічними і зливовими водами, а також з донних відкладів. З іншого боку, вони також активно асимілюються рослинними організмами, внаслідок чого концентрація біодоступної форми азоту, фосфору і силіцію знижується. До цієї форми відносяться неорганічні сполуки азоту (йони NH_4^+ , NO_2^- і NO_3^-) і неорганічні сполуки фосфору (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}), а також мономерно-димерна форма силікатної кислоти. У поверхневих водах, які зазнають антропогенного забруднення, виявлено домінування неорганічних сполук азоту і фосфору, які для скорочення позначено як $N_{\text{неорг}}$ і $P_{\text{неорг}}$ оскільки концентрацію зазначених сполук азоту і фосфору виражено в мг N або P/дм^3 . Наприклад, у воді р. Бучі вище за течією і поза межами міської агломерації Буча, Ірпінь і Гостомель концентрація $N_{\text{неорг}}$ і загального азоту ($N_{\text{заг}}$) не перевищувала відповідно 1,3 та 5,2 мг N/дм^3 , тоді як в межах цієї агломерації вона істотно зростала і знаходилась в інтервалі відповідно 0,8–22,6 та 3,8–30 мг N/дм^3 . Вміст $P_{\text{неорг}}$ і загального фосфору ($P_{\text{заг}}$) у воді р. Бучі поза межами досліджуваної міської агломерації і вище за течією варіював у діапазоні 0,031–0,046 і 0,243–0,272 мг P/дм^3 , а в її межах концентрація зазначених сполук фосфору відчутно зростала і досягала 0,034–1,625 і 0,293–1,776 мг P/дм^3 . На ділянках річок Ірпінь і Буча, де простежувалось забруднення води сполуками азоту і фосфору, частка $N_{\text{неорг}}$ і $P_{\text{неорг}}$ досягала в середньому 55,6–69,5% $N_{\text{заг}}$ і 46,2–67,0% $P_{\text{заг}}$ тоді як вище за течією вона була нижчою і не перевищувала в середньому відповідно 23,8–48,0% $N_{\text{заг}}$ і 15,2–43,7% $P_{\text{заг}}$. Частка $N_{\text{неорг}}$ і $P_{\text{неорг}}$ у воді ставка поблизу Гостомельської міської ради невисока і в середньому не перевищувала 19,4% $N_{\text{заг}}$ і 5,3% $P_{\text{заг}}$. Це вказує на те, що вода в ньому не зазнає такого істотного забруднення зазначеними сполуками, як річки Буча, Рокач і Ірпінь. Причина цього — відсутність явного надходження зливових і стічних вод (рис. 2).

У водних об'єктах з уповільненим водообміном концентрація $N_{\text{неорг}}$ і $P_{\text{неорг}}$ та розчинного силіцію у поверхневому горизонті води може знижуватись майже до аналітичного нуля за рахунок їхнього ак-

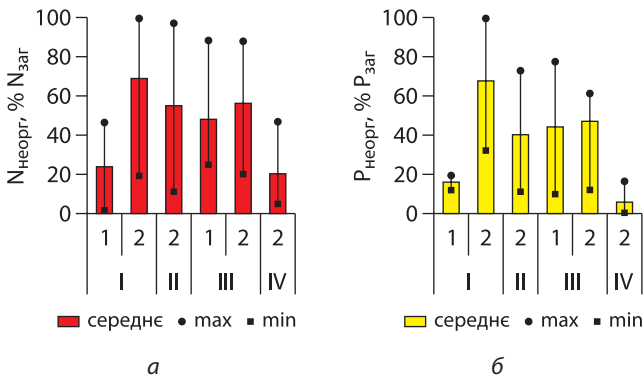


Рис. 2. Частка $N_{\text{неорг}}$ (а) і $P_{\text{неорг}}$ (б) у воді річок Буча (I), Рокач (II), Ірпінь (III) і ставка поблизу Гостомельської міської ради (IV) протягом 2022–2023 рр.: 1 — вище за течією річок і поза межами міської агломерації Буча, Ірпінь і Гостомель; 2 — в межах зазначеної міської агломерації

тивного споживання макрофітами, фітопланктоном, фітоепіфітом, перифітомом. На прикладі акваторії озера Вербного нами також було виявлено вплив заростей вищих водних рослин на вміст $N_{\text{неорг}}$ і $P_{\text{неорг}}$ амонійного азоту і нітрат-йонів, концентрація яких знижувалась у декілька разів порівняно з чистоводдям (Zhezherya & Zhezherya, 2021). Водночас, у водній товщі нижче термокліну спостерігається істотне зростання вмісту зазначених біогенних сполук, що зумовлено їхнім низьким споживанням гідробіонтами і інтенсивним надходженням з донних

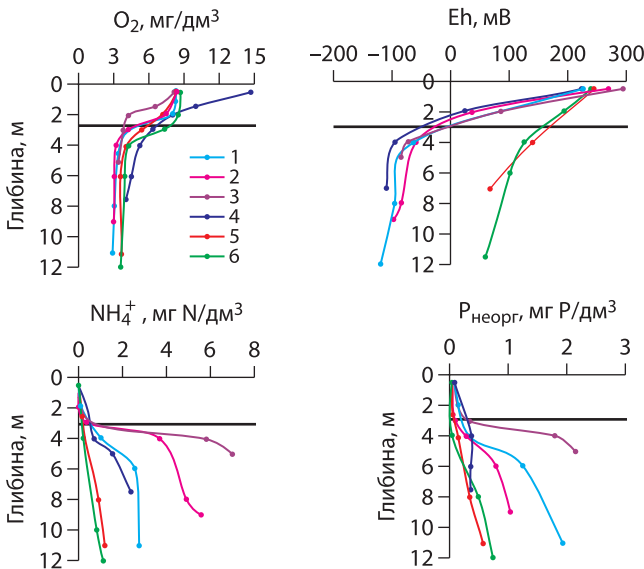


Рис. 3. Зміни вмісту розчиненого кисню, величин Eh-потенціалу, концентрації амонійного азоту і $P_{\text{неорг}}$ в озерах системи Опечень з глибиною у червні 2021 р. Тут і на рис. 3: 1, 2, 3, 4, 5, 6 — озера відповідно Мінське, Лугове, Пташине, Богатирське, Кирилівське і Йорданське. Зону термокліну позначено суцільною горизонтальною лінією

відкладів при формуванні дефіциту розчиненого кисню у придонному горизонті води під час прямої і зворотної температурної стратифікації. На рис. 3 показано просторові зміни вмісту амонійного азоту і $P_{\text{неорг}}$ з глибиною в озерах системи Опечень, а також концентрації розчиненого кисню і величини Eh-потенціалу (Zhezherya et al., 2022).

Саме за дефіциту розчиненого кисню формуються сприятливі умови для міграції біогенних речовин з донних відкладів до води, яка контактує з ними. Наприклад, в озерах системи Опечень вміст NH_4^+ у поверхневому горизонті води досягав мінімальних величин (0,040–0,090 мг N/дм³) влітку, а максимальних (0,706–1,666 мг N/дм³) — взимку. Його концентрація у придонному горизонті води протягом року становила 0,207–13,17 мг N/дм³, досягаючи максимальних величин перед настанням осінньої гомотермії. Вміст $P_{\text{неорг}}$ у воді озер системи Опечень змінювався від 0,010 до 3,121 мг P/дм³. Максимальні величини були характерними для придонного горизонту води. Сезонна і просторова динаміка неорганічного фосфору була подібна до амонійного азоту. Концентрація розчинного силіцію у воді озер системи Опечень протягом 2021 р. змінювалась від 0,03 до 6,4 мг/дм³. Мінімальні його концентрації виявлено у поверхневому горизонті води під час інтенсифікації розвитку діатомових водоростей навесні, а в деяких випадках і восени. Максимальна концентрація розчинного силіцію була характерною для придонного горизонту води, що пояснюється його надходженням з донних відкладів та меншим споживанням біотою. У інших досліджуваних озерах динаміка біогенних речовин була подібною, але вміст $N_{\text{неорг}}$ і $P_{\text{неорг}}$ був дещо нижчим (Zhezherya & Zhezherya, 2021; Vyshnevskiy et al., 2021; Zhezherya et al., 2019).

Розчинені органічні речовини. До найпоширенішої групи POP належать ГР, які характеризуються найбільшою стійкістю до деструкції. До POP природного походження також відносяться білково-подібні речовини і вуглеводи, які надходять до водного середовища переважно з прижиттєвими виділеннями гідробіонтів і внаслідок деструкції відмерлих решток організмів. До особливостей водних об'єктів урбанізованої території слід віднести зростання частки вуглеводів і інших груп органічних речовин, які не ідентифіковані, і зниження частки ГР. Наприклад, у воді р. Ірпінь частка не ідентифікованих груп POP становила 20,1–33,7% $C_{\text{орг}}$ і була нижчою, ніж у гирлах більш забруднених річок Буча і Рокач. Частка інших груп POP у цих річках знаходилась в межах 19,7–62,7% (у середньому 38,6% $C_{\text{орг}}$). У верхніх трьох озерах системи Опечень, які характеризуються як більш забруднені, частка інших груп

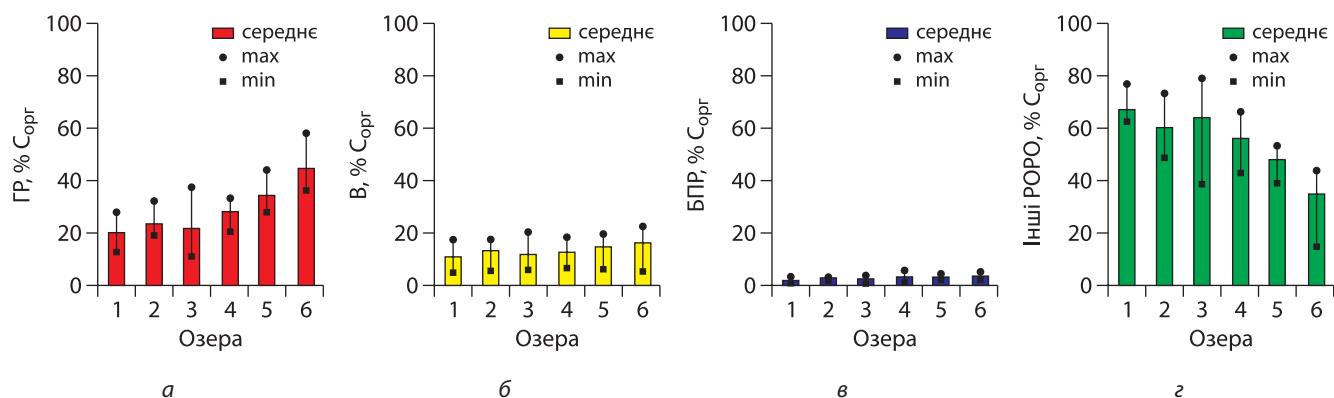


Рис. 4. Частка гумусових речовин (а), вуглеводів (В) (б), білковоподібних речовин (БПР) (в) і інших РОР (з) у воді озер системи Опечень протягом 2021 р. з урахуванням усіх сезонів

РОР була доволі високою і становила в середньому 60,5–67,1% C_{org} , тоді як у нижніх трьох озерах цієї системи їхня частка знижувалась вниз за течією від 66,3 до 14,5% C_{org} тобто від оз. Андріївського до оз. Йорданського, та становила в середньому 34,7–56,3% C_{org} (рис. 4). Це вказує на поступове очищення води у зазначених озерах від інших не ідентифікованих груп РОР. Максимальні величини частки вуглеводів і ГР простежувались влітку і восени. Водночас, частка інших РОР в усіх озерах системи Опечень знижувалась від зими до осені, що зумовлено їхнім поступовим промиванням і розбавленням дощовою водою у зазначений період.

Метали. У межах населених пунктів поверхневі води зазнають забруднення сполуками Zn, Cd, Pb, Cr, Cu, Mn та деяких інших металів. Для антропогенно змінених водних об'єктів характерне зростання у воді абсолютного і відносного вмісту лабіль-

ної фракції металів. Її частка, зазвичай, перевищує 50% концентрації металу у розчиненому стані (рис. 5).

Лабільна фракція — це важлива складова розчиненої форми металу, яка включає аква- і гідроксокомплексні комплекси з неорганічними лігандами і нестійкі комплексні сполуки з органічними лігандами. Метали у складі зазначеної фракції відносяться до потенційно біодоступної і токсичної форми металів. За результатами досліджень встановлено істотну різницю у значеннях частки лабільної фракції металів у водних об'єктах з різним антропогенним навантаженням (рис. 6). Максимальні показники цієї фракції простежуються у невеликих водних об'єктах, які знаходяться у межах урбанізованої території і зазнають впливу зливових і стічних вод. До таких водних об'єктів належать річки Либідь, Сирець, Буча, Рокач і озера системи Опечень.

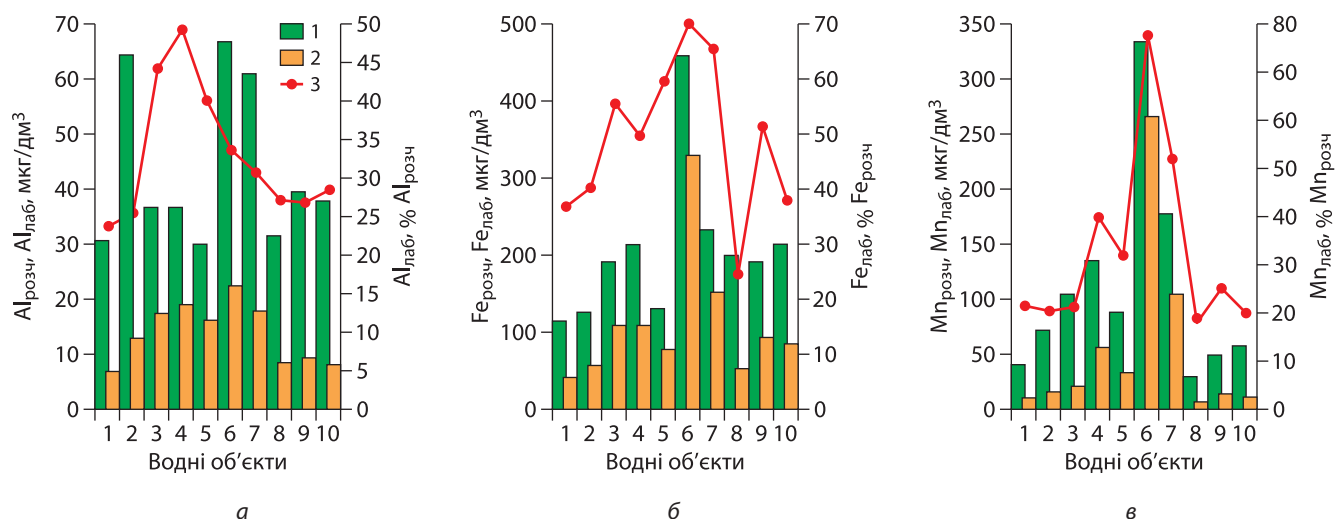


Рис. 5. Концентрація ($\mu\text{kg}/\text{dm}^3$) розчиненої форми (1) і лабільної фракції (2) металів (а — Al; б — Fe; в — Mn) за усередненими значеннями у водних об'єктах міської агломерації Буча, Ірпінь і Гостомель та частка лабільної фракції (% $M_{розч}$) металів (3) у зазначених об'єктах, 2024 р.

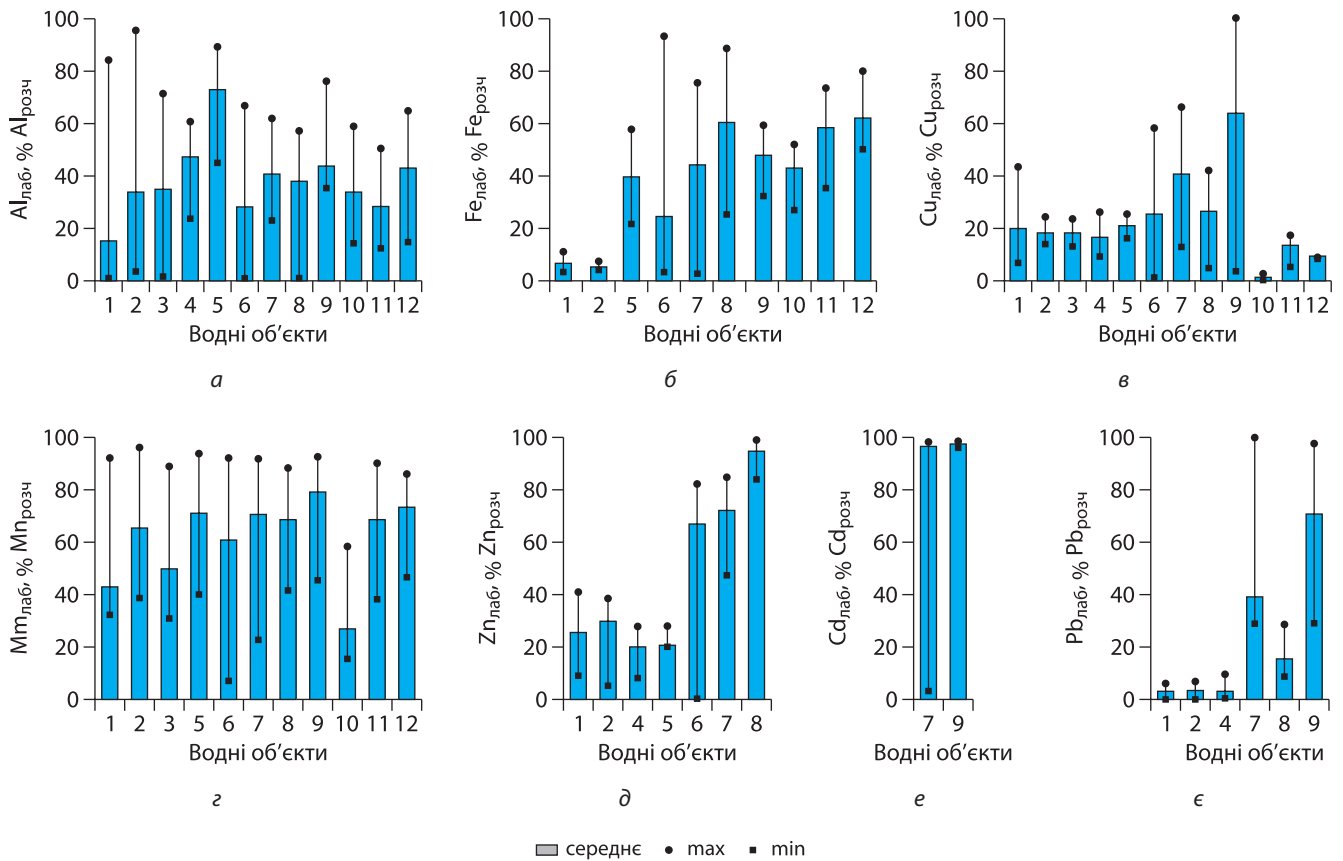


Рис. 6. Частка лабільної фракції алюмінію ($Al_{лаб}$), феруму ($Fe_{лаб}$), купруму ($Cu_{лаб}$), мангану ($Mn_{лаб}$), цинку ($Zn_{лаб}$), кадмію ($Cd_{лаб}$) і свинцю ($Pb_{лаб}$) у водних об'єктах з різним антропогенним навантаженням: 1, 2 — Київське і Канівське водосховища; 3 — річки басейну Прип'яті; 4, 5 — озера Тельбін і Вербне; 6 — Китаївські ставки; 7 — озера системи Опечень; 8 — р. Сирець; 9 — р. Либідь; 10, 11, 12 — річки Ірпінь, Рокач, Буча. Інформація про час досліджень наведена на початку розділу "Матеріали і методи досліджень"

Наприклад, для річок Ірпінь, Буча і Рокач характерні високі концентрації розчинної форми Mn і Cr, які змінювались у межах 26,8–2346 і 7,0–93,9 мкг/дм³, а найбільш забрудненою виявилась р. Буча. Максимальні величини вмісту розчинених мангану і хрому (відповідно 160–2346 і 37,2–94,0 мкг/дм³) були характерними для води р. Буча на станції 6 (р. Буча, вул. Вокзальна, м. Буча). Водночас, вище за течією р. Буча (станція 1) їхня концентрація становила лише відповідно 34,2–55,0 і 7–12 мкг/дм³. У річках Рокач і Ірпінь вміст розчиненого мангану знаходився в межах 26,8–303 і 57,8–192 мкг/дм³, а концентрація розчиненого хрому — 13,6–19,7 і 9,5–16,2 мкг/дм³. Таким чином, максимальні зміни вмісту розчинених мангану і хрому свідчать про найбільш забруднену ділянку р. Буча. Такий високий вміст розчиненого мангану на станції 6 зумовлений дефіцитом розчиненого кисню, оскільки його концентрація не перевищувала 0–0,5 мг/дм³, і формуванням відновлювальних умов ($Eh = -120 \div 92$ мВ). У водних об'єктах зазначеної урбанізованої території також спостерігається зростання частки лабільної фракції

металів. Наприклад, частка $Mn_{лаб}$ у воді р. Бучі поза населеними пунктами становила лише 14,2%, тоді як у межах агломерації Буча, Ірпінь і Гостомель вона була набагато вищою і вже знаходилась у межах 48,3–92,5% загального вмісту $Mn_{розч}$ (див. рис. 4). Зростання вмісту лабільної фракції металів негативно позначається на якості води. Наприклад, вода р. Либідь у 2014 р. зазнавала забруднення такими металами, як Cu, Zn, Cd і Pb. Концентрація їхньої розчинної форми знаходилась в межах 7,0–82,5, 22,6–81,0, 8,0–32,0 і 26,7–108,4 мкг/дм³. Частка лабільної фракції цих металів становила відповідно 35,7–100, 84,3–99,3, 96,2–98,3 і 28,9–97,6% їхнього вмісту у розчиненому стані. У водоймах з уповільненим водообміном (ставки, озера) концентрація розчинених Mn і Fe, зазвичай, зростає у придонному горизонті води під час літньої і зимової температурної стратифікації. Це зумовлено надходженням цих металів із донних відкладів, інтенсивність якого зростає за дефіциту O_2 . У цьому випадку зазначені метали також представлені переважно лабільною фракцією. Для прикладу нижче наведено результа-

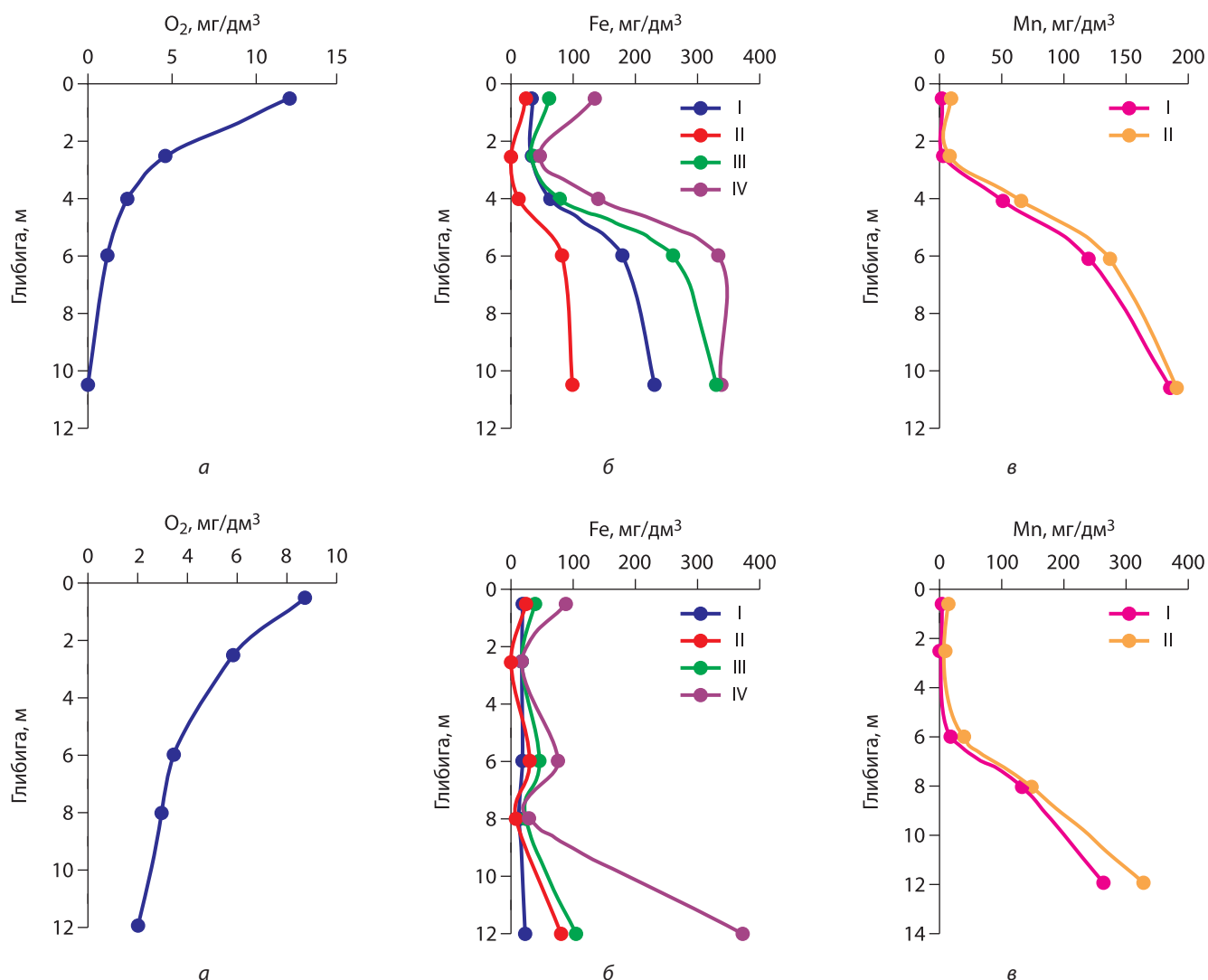


Рис. 7. Динаміка вмісту розчинених кисню (а, з), феруму і його форм знаходження (I — сполуки Fe^{2+} ; II — сполуки Fe^{3+} ; III — лабільна форма феруму, представлена сполуками Fe^{2+} і Fe^{3+} ; IV — загальний вміст $\text{Fe}_{\text{розч}}$) (б, д) та мангану і його лабільної фракції (відповідно II і I) (в, е) з глибиною у воді озер Мінського (а, б, в) і Йорданського (з, д, е) у липні 2016 р.

ти досліджень води озер Мінське і Йорданське, які належать до озер системи Опечень (рис. 7).

Розчинений кисень. Окремо слід зазначити, що у місцях локального забруднення поверхневих вод завжди спостерігається дефіцит розчиненого кисню і зниження величини Eh-потенціалу від 100 мВ до від'ємних значень (Zhezherya et al., 2025). У водних об'єктах з уповільненим водообміном дефіцит розчинного кисню і формування відновлювальних умов відбувається у придонному горизонті води нижче термокліну, якщо глибина водойми більша, ніж 3–4 м (Linnik & Zhezherya, 2022; Vyshnevskiy et al., 2021; Zhezherya et al., 2019). Відбувається посилення негативного впливу урбанізації на гідрохімічний режим водних об'єктів у зв'язку зі змінами клімату, оскільки за зростання температури насичення води киснем буде лише погіршуватись. За результатами

наших експериментальних досліджень стосовно впливу температури води на міграцію біогенних і органічних речовин та сполук металів з донних відкладів було встановлено, що зростання температури води від 5°C до 25°C призводить до збільшення вмісту неорганічного азоту, неорганічного і загального фосфору та розчинного силіцію у 1,8, 5,8, 1,9 і 2,5 рази. За таких умов концентрація легкоокиснюваних органічних речовин і загальна концентрація органічних речовин також збільшувалась приблизно в 1,6 рази, а вміст алюмінію, мангану і хрому зростав в 1,9, 3,2 і 2 рази (Zhezherya et al., 2023).

ВИСНОВКИ

У межах населених пунктів поверхневі водні об'єкти тією чи іншою мірою зазнають антропогенного впливу, який істотно позначається на хімічному

складі води. Зростання мінералізації і трансформація йонного складу води простежується взимку і навесні, коли з водозбору змиваються сольові суміші, які використовувались проти ожеледиці. Це призводить до зростання концентрації хлоридів та йонів натрію. У воді озер системи Опечень вміст йонів Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- і SO_4^{2-} зростає приблизно у 3–5 разів порівняно з фоновими величинами, досягаючи відповідно 92–164, 38–53, 91–186 і 101–247 мг/дм³. Йонний склад води в цих озерах зазнавав трансформації від $(\text{Cl}_{\text{II}}^{\text{Na}}, \text{CCl}_{\text{II}}^{\text{Na,Mg}}, \text{CCl}_{\text{II}}^{\text{Ca,Na}}, \text{SCl}_{\text{II}}^{\text{Na,Mg}})$ до $(\text{Cl}_{\text{III}}^{\text{Ca}})$. У межах міської агломерації Буча, Ірпінь і Гостомель величини мінералізації води зазнавали максимальних змін у р. Буча (≈ 240 мг/дм³), а в річках Ірпінь і Рокач — відповідно 56–73 і 70–123 мг/дм³. Для водних об'єктів острова Галерний встановлено вплив зливових вод колекторів на мінералізацію і вміст хлоридів. Передусім це стосується озер Миколайчик і Єрик, де їхній вміст у воді становив 267–491 мг/дм³ і 180–265 мг/дм³. Мінералізація води і концентрація хлорид-йонів у воді з колекторів знаходилась у межах 2230–7500 мг/дм³ і 756–3839 мг/дм³. До великої проблеми водних об'єктів урбанізованої території слід віднести надходження до них біогенних речовин, зокрема неорганічних сполук азоту і фосфору, які викликають евтрофування водойм з подальшими негативними наслідками, такими як дефіцит розчиненого кисню і "цвітіння" води. В антропогенно змінених водних об'єктах частка неорганічних сполук азоту і фосфору перевищує 50% їхнього загального вмісту в розчиненому стані. На ділянках річок Ірпінь і Буча, де простежувалось забруднення води сполуками азоту і фосфору, частка неорганічних азоту і фосфору досягала в середньому 55,6–69,5% $\text{N}_{\text{заг}}$ і 46,2–67,0% $\text{P}_{\text{заг}}$. До ще однієї особливості водних об'єктів урбанізованих територій відносять високий вміст у них розчинених органічних речовин і варіювання їхнього компонентного складу. Відстежується зростання частки вуглеводів і інших не ідентифікованих груп органічних сполук, натомість частка гумусових речовин знижується. Частка не ідентифікованих груп РОР у воді р. Ірпінь становила 20,1–33,7% $\text{C}_{\text{орг}}$, а у воді більш забруднених річок Буча і Рокач вона знаходилась в межах 19,7–62,7% (у середньому 38,6%

$\text{C}_{\text{орг}}$). У воді озер системи Опечень частка не ідентифікованих груп РОР зменшувалась від оз. Мінського до оз. Йорданського в середньому від 67,1 до 14,5% $\text{C}_{\text{орг}}$. У межах урбанізованої території водні об'єкти зазнають забруднення сполуками різних металів, але небезпеку для живого становить їхня лабільна фракція, яка, зрештою, помітно зростає. Частка цієї фракції становить понад 50% розчиненої форми металів у місцях локального забруднення водного об'єкта, а також і в придонному горизонті води за інтенсифікації вторинного забруднення. У межах агломерації Буча, Ірпінь і Гостомель частка лабільного мангану знаходилась у межах 48,3–92,5% $\text{Mn}_{\text{розч}}$. Частка лабільної фракції Cu, Zn, Cd і Pb у воді р. Либідь становила відповідно 35,7–100, 84,3–99,3, 96,2–98,3 і 28,9–97,6% їхнього вмісту у розчиненому стані. У водних об'єктах, які зазнають прямої і зворотної температурної стратифікації, зафіксовано зростання мінералізації води, вмісту біогенних і органічних речовин та деяких металів, зокрема мангану і феруму, через їхнє надходження із донних відкладів. Тривалий дефіцит розчиненого кисню зі зниженням величини Eh-потенціалу зумовлює формування відновлювальних умов у придонному горизонті водойм, що слід розглядати як ще одну доволі важливу особливість водних об'єктів урбанізованої території. Всі ці зміни хімічного складу води призводять до погіршення стану водного середовища і його непридатності для функціонування і розвитку гідробіотів, а також використання води в різних сферах господарювання, включаючи питне водопостачання. Важливо зазначити, що в умовах кліматичних змін розвиток негативних явищ внаслідок антропогенного впливу посилюватиметься, зумовлюючи виникнення значних екологічних проблем, передусім, для малих водойм і водотоків. Повного уникнення негативного антропогенного впливу на поверхневі водні об'єкти урбанізованої території досягти доволі складно, але істотне його зниження стає цілком реальним. Воно досягається за умов розроблення та впровадження низки ефективних заходів (технологій), які б унеможливили, або зводили до мінімуму як зовнішнє, так і внутрішнє надходження поживних речовин до таких водних об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

- Дебейко, Е.В., Рябов, А.К., Набиванец, Б.И. (1973). Прямое фотометрическое определение растворимых белков в природных водах. *Гидробиол. журн.*, 9 (6), 109–113.
- Денисова, А.И., Нахшина, Е.П., Новиков, Б.И., Рябов, А.К. (1987). Донные отложения водохранилищ и их влияние на качество воды. Киев: Наукова думка.
- Денисова, А.И., Тимченко, В.М., Нахшина, Е.П. и др. (1989) Ги-

- дрология и гидрохимия Днепра и его водохранилищ. Киев: Наукова думка.
- Линник, П.Н., Набиванец, Ю.Б. (1988). Применение анодной инверсионной вольтамперометрии для определения свободных и связанных в комплексы ионов цинка и свинца в природных водах. *Гидробиол. журн.*, 24 (1), 68–71.

- Линник, П.М., Морозова, А.О. (2006). Десорбція сполук азоту, фосфору і заліза з донних відкладів за дії різних чинників. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 10, 73–81.
- Набиванец, Б.И., Линник, П.Н., Калабина, Л.В. (1981). Кинетические методы анализа природных вод. Киев: Наукова думка.
- Набиванец, Б.И., Осадчий, В.И., Осадча, Н.М., Набиванец, Ю.Б. (2007). Аналітична хімія поверхневих вод. Київ: Наукова думка.
- Розроблення плану управління районом річкового басейну Дніпра в Україні: Фаза 1, Крок 1 — Опис характеристик району річкового басейну. Водна ініціатива Європейського Союзу Плюс для країн Східного партнерства (EUWI+ East). 19.02.2019. (с. 138).
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши (1977). Под ред. А.Д. Семенова. Ленинград: Гидрометеиздат.
- Савранский, Л.И., Наджафова, О.Ю. (1992). Спектрофотометрическое исследование комплексообразования Cu, Fe и Al с хромазулом S в присутствии смеси катионного и неионогенного ПАВ. *Журн. аналит. химии*, 47 (9), 1613–1617.
- Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L. et al. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8 (3), 559–568. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2)
- Heathwaite, A.L., Johnes, P.J., Peters, N.E. (1996). Trends in nutrients. *Hydrological Processes*, 10, 263–293. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199602\)10:2<263::AID-HYP441>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199602)10:2<263::AID-HYP441>3.0.CO;2-K)
- Kowalczywska-Madura, K., Dondajewska, R., Gołdyn, R., Kozak, A., Messyasz, B. (2018). Internal phosphorus loading from the bottom sediments of a dimictic lake during its sustainable restoration. *Water Air Soil Pollut.*, 229. Article number 280, 18 p.
- Linnik, P.M., Iskra, I.V. (1994). Application of anodic stripping voltammetry to the investigation of the physicochemical state of cadmium in surface water in the Ukraine. *Microchem. J.*, 50 (2), 184–190.
- Linnik, P.M., Zhezherya, V.A. (2022). Peculiarities of the dynamics of some elements of hydrochemical regime in small water bodies of urban territories: oxygen regime and dissolved solids content. *Hydrobiol. J.*, 58 (4), 91–107. DOI: 10.1615/HydrobJ.v58.i4.70
- Linnik, P.N. (2003). Complexation as the most important factor in the fate and transport of heavy metals in the Dnieper water bodies. *Anal. Bioanal. Chem.*, 376 (3), 405–412. DOI: 10.1007/s00216-003-1882-5
- Linnik, P.N., Ivanechko, Ya.S., Linnik, R.P., Zhezherya, V.A. (2013). Humus substances of surface waters and the peculiarities of their distribution among various fractions. *Hydrobiol. J.*, 49 (5), 90–111. DOI: 10.1615/HydrobJ.v49.i5.100
- Linnik, P.N., Leshchinskaya, A.A., Nabivanets, B.I. (1989). Methodology for investigating coexisting forms of chromium in natural waters. *Hydrobiol. J.*, 25 (2), 91–96.
- Linnik, P.N., Zhezherya, V.A., Linnik, R.P. (2018). Lability of metals in surface waters as the main characteristics of their potential bioavailability (a review). *Hydrobiol. J.*, 54 (6), 3–26. DOI: 10.1615/HydrobJ.v54.i6.10
- Lowry, O.H., Rosebrough, N. J., Farr, G.A., Randall, R.I. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagents. *Biol. Chem.*, 193 (1–2), 265–268.
- Nazari-Sharabian, M., Ahmad, S., Karakouzian, M. (2018). Climate change and eutrophication: a short review. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, 8 (6), 3668–3672. <https://doi.org/10.48084/etasr.2392>
- Osadchyy, V., Nabyvanets, B., Linnik, P., Osadcha, N., Nabyvanets, Yu. (2016). Processes determining surface water chemistry. Switzerland: Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-319-42159-9
- Rathorel, S.S., Chandravanshi, P., Chandravanshi, A. Jaiswal, K. (2016). Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on aquatic ecosystem. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 9 (3), 89–96. DOI: 10.9790/2380-0910018996
- Rubini P., Lakatos A., Champmartin D., Kiss T. (2002). Speciation and structural aspects of interactions of Al(III) with small biomolecules. *Coord. Chem. Reviews*, 228, 137–152. [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(01\)00467-2](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(01)00467-2)
- Sellers, B.H. & Markland, H.R. (1987). Decaying lakes: the origins and control of eutrophication., New York: John Wiley & Sons.
- Trottet, A., George, C., Drillet, G., Lauro, F.M. (2022). Aquaculture in coastal urbanized areas: A comparative review of the challenges posed by Harmful Algal Blooms. *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.*, 52 (16), 2888–2929. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1897372>
- Vermond, K., Leuven, R.S.E.W., van der Velde, G. et al. (2009). Urban drainage systems: an undervalued habitat for aquatic macroinvertebrates. *Biol. Conserv.*, 142 (5), 1105–1115. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.01.026>
- Vyshnevskiy, V.I., Zhezherya, V.A., Nezbrjytska, I.M., Bilous, O.P. (2021). The impact of aeration on ecological state of lake Telbyn in Kyiv. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*, 30 (1), 179–189. DOI: 10.15421/112116
- Wu, Y., Wen, Y., Zhou, J., Wu, Y. (2013). Phosphorus release from lake sediments: Effects of pH, temperature and dissolved oxygen. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18 (1), 323–329. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0192-0>
- Zhezherya, T.P., Zhezherya, V.A., Linnik, P.M., Osipenko, V.P. (2025). Hydrochemical characteristics of small rivers and water bodies within the urbanized territory. *Hydrobiol. J.*, 61 (1), 86–106. DOI: 10.1615/HydrobJ.v61.i1.80
- Zhezherya, V.A., Linnik, P.N., Belous, Ye. P. (2019). Improvement in the hydrochemical regime of small urban water bodies under conditions of artificial aeration (on the example of Lake Telbin). *Hydrobiol. J.*, 55 (4), 94–110. DOI: 10.1615/HydrobJ.v55.i4.90
- Zhezherya, V.A., Zhezherya, T.P. (2021). Spatial and temporal changes in the concentration of nutrients in urban water body (on the example of lake Verbne, Kyiv). *Hydrobiol. J.*, 57 (2), 96–107. DOI: 10.1615/HydrobJ.v57.i2.90
- Zhezherya, V.A., Zhezherya, T.P., Linnik, P.M., Osipenko, V.P. (2023). Experimental simulation of the influence of temperature on the migration of substances from bottom sediments. *Hydrobiol. J.*, 59 (6), 83–98. DOI: 10.1615/HydrobJ.v59.i6.70
- Zhezherya, V.A., Zhezherya, T.P., Linnik, P.M., Osipenko, V.P., Yevtikh, T.V. (2022). Peculiarities of the dynamics of some elements of hydrochemical regime in small water bodies of urban territories: nutrients and organic matter. *Hydrobiol. J.*, 58 (6), 81–103. DOI: 10.1615/HydrobJ.v58.i6.50

REFERENCES

- Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L. et al. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8 (3), 559–568. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2)

- Debeiko, E.V., Ryabov, A.K., Nabivanets, B.I. (1973). Direct photometric determination of soluble proteins in natural waters. *Hydrobiol. J.*, 9 (6), 109–113. [in Russian]
- Denisova, A.I., Nakhshina, E.P., Novikov, B.I., Ryabov, A.K. (1987). Bottom sediments of reservoirs and their influence on water quality. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian]
- Denisova, A.I., Timchenko, V.M., Nakhshina, E.P. et al. (1989) Hydrology and hydrochemistry of the Dnieper and its reservoirs. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian]
- Development of a management plan for the Dnieper River Basin District in Ukraine: Phase 1, Step 1 — Description of the characteristics of the river basin district. European Union Water Initiative Plus for the Eastern Partnership Countries (EUWI+ East). 19.02.2019. (p. 138). [in Ukrainian]
- Heathwaite, A.L., Johnes, P.J., Peters, N.E. (1996). Trends in nutrients. *Hydrological Processes*, 10, 263–293. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199602\)10:2<263::AID-HYP441>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199602)10:2<263::AID-HYP441>3.0.CO;2-K)
- Kowalczywska-Madura, K., Dondajewska, R., Gołdyn, R., Kozak, A., Messyasz, B. (2018). Internal phosphorus loading from the bottom sediments of a dimictic lake during its sustainable restoration. *Water Air Soil Pollut.*, 229. Article number 280, 18 p.
- Linnik, P.M., Iskra, I.V. (1994). Application of anodic stripping voltammetry to the investigation of the physicochemical state of cadmium in surface water in the Ukraine. *Microchem. J.*, 50 (2), 184–190.
- Linnik, P.M., Morozova, A.O. (2006). Desorption of nitrogen, phosphorus and iron compounds from bottom sediments under the action of various factors. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 10, 73–81. [in Ukrainian]
- Linnik, P.M., Zhezherya, V.A. (2022). Peculiarities of the dynamics of some elements of hydrochemical regime in small water bodies of urban territories: oxygen regime and dissolved solids content. *Hydrobiol. J.*, 58 (4), 91–107. DOI: 10.1615/HydrobJ.v58.i4.70
- Linnik, P.N. (2003). Complexation as the most important factor in the fate and transport of heavy metals in the Dnieper water bodies. *Anal. Bioanal. Chem.*, 376 (3), 405–412. DOI: 10.1007/s00216-003-1882-5
- Linnik, P.N., Ivanenko, Ya.S., Linnik, R.P., Zhezherya, V.A. (2013). Humus substances of surface waters and the peculiarities of their distribution among various fractions. *Hydrobiol. J.*, 49 (5), 90–111. DOI: 10.1615/HydrobJ.v49.i5.100
- Linnik, P.N., Leshchinskaya, A.A., Nabivanets, B.I. (1989). Methodology for investigating coexisting forms of chromium in natural waters. *Hydrobiol. J.*, 25 (2), 91–96.
- Linnik, P.N., Nabivanets, Yu.B. (1988). Application of anodic inversion voltammetry for the determination of free and complexed zinc and lead ions in natural waters. *Hydrobiol. J.*, 24 (1), 68–71. [in Russian]
- Linnik, P.N., Zhezherya, V.A., Linnik, R.P. (2018). Lability of metals in surface waters as the main characteristics of their potential bioavailability (a review). *Hydrobiol. J.*, 54 (6), 3–26. DOI: 10.1615/HydrobJ.v54.i6.10
- Lowry, O.H., Rosebrough, N. J., Farr, G.A., Randall, R.I. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagents. *Biol. Chem.*, 193 (1–2), 265–268.
- Manual for chemical analysis of land surface waters (1977). Ed. by A.D. Semenov. Leningrad: Gidrometeoizdat. [in Russian]
- Nabivanets, B.I., Linnik, P.N., Kalabina, L.V. (1981). Kinetic methods for the analysis of natural waters. Kiev: Naukova Dumka. [in Russian]
- Nabivanets, B.Y., Osadchy, V.I., Osadcha, N.M., Nabivanets, Yu.B. (2007). Analytical chemistry of surface waters. Kyiv: Naukova Dumka. [in Ukrainian]
- Nazari-Sharabian, M., Ahmad, S., Karakouzian, M. (2018). Climate change and eutrophication: a short review. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, 8 (6), 3668–3672. <https://doi.org/10.48084/etasr.2392>
- Osadchy, V., Nabyvanets, B., Linnik, P., Osadcha, N., Nabyvanets, Yu. (2016). Processes determining surface water chemistry. Switzerland: Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-319-42159-9
- Rathorel, S.S., Chandravanshi, P., Chandravanshi, A., Jaiswal, K. (2016). Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on aquatic ecosystem. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 9 (3), 89–96. DOI: 10.9790/2380-0910018996
- Rubini, P., Lakatos, A., Champmartin, D., Kiss, T. (2002). Speciation and structural aspects of interactions of Al(III) with small biomolecules. *Coord. Chem. Reviews*, 228, 137–152. [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(01\)00467-2](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(01)00467-2)
- Savransky, L.I., Nadzhafova, O.Yu. (1992). Spectrophotometric study of complexation of Cu, Fe and Al with chromazuril S in the presence of a mixture of cationic and non-ionic surfactants. *J. Analytical Chemistry*, 47 (9), 1613–1617. [in Russian]
- Sellers, B.H. & Markland, H.R. (1987). Decaying lakes: the origins and control of eutrophication., New York: John Wiley & Sons.
- Trottet, A., George, C., Drillet, G., Lauro, F.M. (2022). Aquaculture in coastal urbanized areas: A comparative review of the challenges posed by Harmful Algal Blooms. *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.*, 52 (16), 2888–2929. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1897372>
- Vermonden, K., Leuven, R.S.E.W., van der Velde, G. et al. (2009). Urban drainage systems: an undervalued habitat for aquatic macroinvertebrates. *Biol. Conserv.*, 142 (5), 1105–1115. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.01.026>
- Vyshnevskiy, V.I., Zhezherya, V.A., Nezbryska, I.M., Bilous, O.P. (2021). The impact of aeration on ecological state of lake Telbyn in Kyiv. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*, 30 (1), 179–189. DOI: 10.15421/112116
- Wu, Y., Wen, Y., Zhou, J., Wu, Y. (2013). Phosphorus release from lake sediments: Effects of pH, temperature and dissolved oxygen. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 18 (1), 323–329. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0192-0>
- Zhezherya, T.P., Zhezherya, V.A., Linnik, P.M., Osipenko, V.P. (2025). Hydrochemical characteristics of small rivers and water bodies within the urbanized territory. *Hydrobiol. J.*, 61 (1), 86–106. DOI: 10.1615/HydrobJ.v61.i1.80
- Zhezherya, V.A., Linnik, P.N., Belous, Ye. P. (2019). Improvement in the hydrochemical regime of small urban water bodies under conditions of artificial aeration (on the example of Lake Telbin). *Hydrobiol. J.*, 55 (4), 94–110. DOI: 10.1615/HydrobJ.v55.i4.90
- Zhezherya, V.A., Zhezherya, T.P. (2021). Spatial and temporal changes in the concentration of nutrients in urban water body (on the example of lake Verbne, Kyiv). *Hydrobiol. J.*, 57 (2), 96–107. DOI: 10.1615/HydrobJ.v57.i2.90
- Zhezherya, V.A., Zhezherya, T.P., Linnik, P.M., Osipenko, V.P. (2023). Experimental simulation of the influence of temperature on the migration of substances from bottom sediments. *Hydrobiol. J.*, 59 (6), 83–98. DOI: 10.1615/HydrobJ.v59.i6.70
- Zhezherya, V.A., Zhezherya, T.P., Linnik, P.M., Osipenko, V.P., Yevtukh, T.V. (2022). Peculiarities of the dynamics of some elements of hydrochemical regime in small water bodies of urban territories: nutrients and organic matter. *Hydrobiol. J.*, 58 (6), 81–103. DOI: 10.1615/HydrobJ.v58.i6.50

Vladyslav Zhezherya¹

ORCID 0000-0002-1128-5270

e-mail: zhezheryava1981@gmail.com

Tetyana Zhezherya²

ORCID 0009-0007-2394-7271

e-mail: tanyadyka@ukr.net

Petro Linnik¹

ORCID 0000-0002-2144-4052

e-mail: peter-linnik@ukr.net

Valentyna Osipenko¹

ORCID 0009-0006-3100-4655

e-mail: vosypenko@ukr.net

¹ Institute of Hydrobiology,
National Academy of Sciences of Ukraine

² Ukrainian Hydrometeorological Institute
of the State Emergency Service of Ukraine
and National Academy of Sciences of Ukraine

**FEATURES OF THE HYDROCHEMICAL
REGIME OF ANTHROPOGENICALLY
ALTERED SURFACE WATER BODIES**

Features of the hydrochemical regime of water bodies located within the urbanized area are considered in the article. It has been established that in winter and spring, water salinity and the content of main ions undergo the greatest changes in water bodies that receive stormwater with chemical deicing chemicals. This leads to an increase in the water salinity in general and the concentration of chlorides, sulfates, sodium and magnesium ions in particular. An increase in the concentration of inorganic

nitrogen, phosphorus, organic matter and metals compounds is observed in areas of localized water pollution. Water bodies subject to significant anthropogenic impact are dominated by the inorganic form of nitrogen and phosphorus, which reaches more than 50% of their total content. Anthropogenically altered water bodies are characterized by an increase in the concentration of dissolved organic matter due to an increase in the share of carbohydrates and other unidentified groups of organic compounds, while the share of humic substances decreases. A noticeable increase in the share of carbohydrates usually occurs in summer and autumn, when the water is blooming and phytoplankton and higher aquatic plants are dying off. Anthropogenic pollution of water bodies causes an increase in the share of the labile fraction of metals, which is potentially bioavailable and toxic to aquatic life. This fraction exceeds 50% of their concentration in the dissolved state. An increase in water salinity, the content of biogenic and organic substances, and the labile fraction of metals is also observed in the bottom horizon of water bodies during direct and reverse temperature stratification due to their inflow from bottom sediments. This is primarily due to dissolved oxygen deficiency, a decrease in Eh-potential values, and an increase in water temperature. Secondary water pollution by nutrients should be considered as an important internal source of increased eutrophication of water bodies. As a result, the aquatic environment becomes unsuitable for the life of many oxyphilic aquatic organisms. As the climate warms, these processes will intensify. Therefore, it is important to develop a number of measures to prevent or minimize both external and internal nutrient flows to surface water bodies.

Keywords: water salinity, main ions, nutrients, organic matter, metals, water bodies, urbanized area.



МОРСЬКА ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЯ ТА ОКЕАНОГРАФІЯ

Ю.П. Ільїн

ORCID: 0000-0002-7717-6472
ypilyin@gmail.com

Український гідрометеоро-
логічний інститут
Державної служби України
з надзвичайних ситуацій
та НАН України, Київ

УДК 551.465+551.468.6

DOI: <https://doi.org/10.15407/Meteorology2024.06.072>

ПРОЯВИ ВЗАЄМОДІЇ РІЧКОВИХ І МОРСЬКИХ ВОД У СТАТИСТИЧНІЙ СТРУКТУРІ СОЛОНОСТІ ЗА ДАНИМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НА БЕРЕГОВИХ СТАНЦІЯХ УКРАЇНИ

Проаналізовано часові ряди спостережень 1997–2010 рр. за солоністю води на морських гідрометеорологічних станціях північного узбережжя Північно-західної частини Чорного моря на ділянці від гирла Дніпровсько-Бузького лиману (Кінбурнської протоки) до Одеської затоки. Побудовано емпіричні функції розподілу ймовірності солоності для станцій Очаків, Південне та Одеса-порт для усіх місяців і року у цілому. За допомогою метода аналізу суміші виконано одновимірну кластеризацію емпіричних гістограм солоності у припущенні, що вони складаються із кількох функцій нормального розподілу, кожна з яких репрезентує окрему водну масу і характеризується своїми показниками — середньою величиною, стандартним відхиленням та часткою (пропорцією) у загальному розподілі (суміші). Для пошуку оптимальних рішень застосовано метод максимальної правдоподібності та інформаційний критерій Акаїке. Експериментальним шляхом, із урахуванням особливостей динаміки вод північної частини шельфу Північно-західної частини Чорного моря, встановлено, що гістограми солоності можуть бути апроксимовані сукупністю 2–3 гаусових функцій. Ці функції, як правило, відповідають водам річкового походження, морського походження і проміжним водам як результату взаємодії перших двох. Параметри апроксимації (середні величини, стандартне відхилення та пропорція в суміші) змінюються у просторі у залежності від відстані до джерел розпріснення або осолонення, а також у часі відповідно до сезонної мінливості процесів надходження та взаємодії водних мас на шельфі Північно-західної частини Чорного моря. Отримані кількісні показники складових, з яких складається водна суміш біля північних берегів Північно-західної частини Чорного моря, можуть використовуватися для ймовірного моделювання (прогнозування) солоності води у різних пунктах як для окремих місяців, так і у цілому для року, наприклад, за допомогою методу Монте-Карло.

Ключові слова: солоність води, часові ряди, річковий стік, нормальний розподіл, плавучий шлейф, морські течії.

ВСТУП

Головними причинами коливань солоності біля берегів Північно-західної частини Чорного моря (ПЗЧМ) є річковий стік, адвекція поверхневих та глибинних вод відкритого моря, а також різниця між атмосферними опадами та випаровуванням на морській поверхні. Сезонна та міжрічна мінливість солоності вод біля берегів України, а також у відкритому морі поблизу головних джерел прісної і солоної води, досліджені у Розділі 6 монографії (Ільїн та ін., 2012). Надходження трансформованих річкових вод на шельф ПЗЧМ є потужним чинником формування гідрологічного режиму і екологічних умов морського довкілля (Большаков, 1970; Ільїн,

1999, 2006; Yankovsky, Lemeshko & Ilyin, 2004; Ільїн & Берлінський, 2022; Ільїн, 2022). Гідрологічні процеси у джерелах річкових вод — відкритих лиманах ПЗЧМ — досліджено в монографії (Тимченко, 1990), а чисельні моделі, що імітують циркуляцію та евтрофікацію вод у лиманах, докладно описано, наприклад в (Тучковенко & Тучковенко, 2018).

Нещодавній аналіз попередніх досліджень поширення і трансформації річкових вод у Чорному морі, а також застосування до цієї тематики сучасних уявлень про структуру і динаміку плавучих плюмів (шлейфів) розпріснених вод річок та естуаріїв ("перехідних вод" за термінологією Рамкової директиви по воді ЄС та Водного кодексу України)

наведено в роботі (Ільїн, 2023а) щодо Дніпровсько-Бузької гирлової області. На основі даних багатолітніх берегових та експедиційних спостережень розглянуто структуру і динаміку перехідних вод у системі Дніпровсько-Бузького лиману (ДБЛ) до руйнування Каховської ГЕС. Побудовано середні річні й сезонні карти та вертикальні розрізи температури і солоності. Проаналізовано головні чинники формування та поширення перехідних вод — річковий стік, контраст солоності та приземний вітер. Розраховано і проаналізовано низку розмірних і безрозмірних критеріїв та показників динаміки перехідних вод у межах та за межами ДБЛ. У статті (Ільїн, 2023b) за даними супутникових спостережень простежено поширення аномального скиду дніпровських вод після підриву росіянами греблі Каховської ГЕС 06.06.2023, його вплив на динаміку та евтрофування шельфових вод.

У статті (Yankovsky & Ilyin, 2024) докладно проаналізовано прецизійні експедиційні та супутникові спостереження попередніх десятиліть щодо плавучого шлейфу перехідних вод, які надходять із Дніпровсько-Бузького лиману. Поширюючись уздовж берега у напрямку Одеської затоки, шлейф може відхилитися вліво (у південному напрямку) під дією зустрічного вітру або зменшення початкового імпульсу, наданого об'ємним потоком річкових вод. Тобто, за маловітряних умов, плум може дістатися тим далі уздовж берега, чим більші витрати річкових вод на вході до гирлової області. Таке просування вочевидь повинно відтворюватися у коливаннях солоності морської води, яка реєструється щодня на морських гідрометеорологічних станціях (МГ), розташованих на узбережжі від гирла ДБЛ до Одеської затоки, а саме — МГ Очаків, оперативна група (ОГ) Південне та МГ Одеса-порт.

Вплив вітру, який діє у напрямку просування розпріснених вод, прискорює цей рух і сприяє притисканню плавучого плуму до узбережжя, а складова зустрічного вітру гальмує просування, відхиляє плум від берега і сприяє швидкому перемішуванню прісного витоку з фоновою водою на шельфі. Натомість ця шельфова вода надходить до Дніпровсько-Бузького лиману і підвищує солоність води в ньому (Ільїн, 2023а). Цей зворотній процес також має відбиватися у даних спостережень на станціях узбережжя, особливо в Очакові, який розташований у гирлі ДБЛ — Кінбурнській протоці.

Дана **робота присвячена** аналізу емпіричних функцій розподілу ймовірності (гістограм) солоності за багаторічними даними берегових станцій з метою з'ясування статистичних показників взаємодії річкових і морських вод у вказаному районі узбережжя, в умовах просторових та сезонних від-

мінностей окреслених динамічних процесів у прибережній смузі моря.

ВИКОРИСТАНІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА АНАЛІЗУ

У роботі використано часові ряди щодобових вимірювань солоності води на МГ Очаків, ОГ Південне та МГ Одеса-порт з початку 1997 по кінець 2010 рр., які входять до інформаційної бази, створеної Морським відділенням Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України (Ільїн та ін., 2012). Цей інтервал часу (14 років) відноситься до так званого другого кліматичного періоду ВМО (1991 — 2020 рр.). Його довжина і дискретність спостережень є достатніми для опису флуктуацій солоності на синоптичному, сезонному та міжрічному (до 5-7 років) масштабах мінливості. Аналіз кліматичної мінливості на масштабах 10-100 років виходить за межі даного дослідження. Для знаходження параметрів розподілу ймовірностей солоності водних мас різного походження на кожній з трьох станцій застосовано метод **аналізу суміші (АС)**.

Аналіз суміші — це метод максимальної правдоподібності для оцінки параметрів (середнього значення, стандартного відхилення та пропорції) двох або більше одновимірних нормальних розподілів на основі об'єднаної вибірки. У даному випадку апріорі припускається, що дані кожної станції отримані з суміші вод різного походження — річкової, морської та проміжної, як продукту взаємодії перших двох. Припускається також, що солоність кожної зі складових суміші підкоряється нормальному (гаусову) закону розподілу ймовірності. Процедура АС реалізована у вільно доступному пакеті статистичного аналізу палеоданих PAST (Hammer et al., 2001). Останню версію пакету можна отримати за посиланням <https://www.nhm.uio.no/english/research/resources/past/>

PAST використовує процедуру (Dempster et al., 1977), яка автоматично виконується 20 разів, кожного разу з новими, випадковими початковими позиціями для середніх S_m ($m = 1, 2, 3, \dots$ — номер групи). Початкові значення стандартного відхилення встановлюються як $\sigma_m = \sigma/M$, де σ — об'єднане стандартне відхилення, а M — кількість груп. Початкові значення для часток (пропорцій) встановлені як $P_m = 1/M$. "Кращі" рішення мають менші від'ємні значення логарифмічної правдоподібності. Для характеристики оптимального рішення алгоритму, який запускається кілька разів для різних значень M , використовується також інформаційний критерій Акаїке (AIC; Akaike, 1974). Мінімальне значення для AIC вказує на те, що виділено кількість груп і па-

раметри нормальних розподілів, які забезпечують найкращу апроксимацію об'єднаної гістограми без надлишкової підгонки.

Результати оцінки визначаються виглядом емпіричної функції розподілу (гістограми) солоності, який спонукає завдання кількості нормальних розподілів для апроксимації об'єднаної вибірки. Експериментальним шляхом та попереднім вивченням особливостей динаміки вод північної частини шельфу ПЗЧМ (Ільїн і др., 2012; Ільїн, 2023а; Yankovsky & Ilyin, 2024) встановлено, що гістограми солоності можуть бути апроксимовані сукупністю 2–3 гаусових функцій. Ці функції, як правило, відповідають водам річкового походження, морського походження і проміжним водам.

Слід зазначити, що для МГ Одеса-порт та ОГ Південне поняття “морська вода” відповідає реальному об'єкту, тобто воді, що надходить з районів відкритого моря через поверхневу адвекцію або унаслідок апвелінгу вод нижнього шару у літній сезон. Стосовно ж МГ Очаків цей термін застосовується **умовно** і означає трансформовану воду річкового походження, яка займає простір на захід від Кінбурнської протоки і має підвищену солоність після взаємодії із морською водою. Відповідно, для районів Південного і Одеси термін “річкова вода” означає трансформовану воду річкового походження, яка на шляху від ДБЛ перемішується із морською водою і значно підвищує свою солоність. Таким чином, у подальшому треба брати до уваги, що “морська” вода для Очакова може бути “річковою” водою для узбережжя Одеської області.

Значення середньої солоності суміші та стандартного відхилення за даними оцінки складових, що утворюють суміш, визначаються формулами (при $M = 3$):

$$S = P_1S_1 + P_2S_2 + P_3S_3; \quad (1)$$

$$\sigma = P_1\sigma_1 + P_2\sigma_2 + P_3\sigma_3. \quad (2)$$

По суті, метод АС є методом неієрархічної одновимірної кластеризації даних спостережень (Hammer et al., 2001).

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На *рис. 1* представлено результати аналізу суміші щодо гістограм солоності води, побудованих за усією сукупністю даних щодобових вимірювань за 1997–2010 рр. на МГ Очаків, ОГ Південне і МГ Одеса-порт. Ці гістограми описують загальнорічний розподіл ймовірностей солоності на зазначених пунктах узбережжя від гирла ДБЛ до Одеської затоки.

Червоними лініями на *рис. 1* накреслено гаусові криві розподілу окремих компонент, що складають суміш. Числові значення параметрів цих кривих для кожної станції спостережень наведено у *табл. 1–3* (останні рядки, виділені напівжирним шрифтом). Ці таблиці містять також результати оцінок методом АС для кожного місяця року за сукупністю щодобових даних інтервалу 1997–2010 років. Відсутність значень параметрів для якоїсь із груп (класів води) означає, що ця група не виділяється як окрема складова суміші за даною сукупністю інформації спостережень. Наприклад, річні оцінки для ОГ Південне (*табл. 2*) отримано лише щодо трансформованих річкових та морських вод. Це означає, що проміжна вода, як результат перемішування, не має достатньої повторюваності (поглинається крайніми складовими) у річному масштабі, хоча для усіх місяців, крім листопада, відповідна крива нормального розподілу виділяється і має помітну пропорцію. Місячні оцінки також відсутні для річкової води на початку року (січень–лютий), тому що вона у середньому ще не досягає цього району. У липні–вересні не виді-

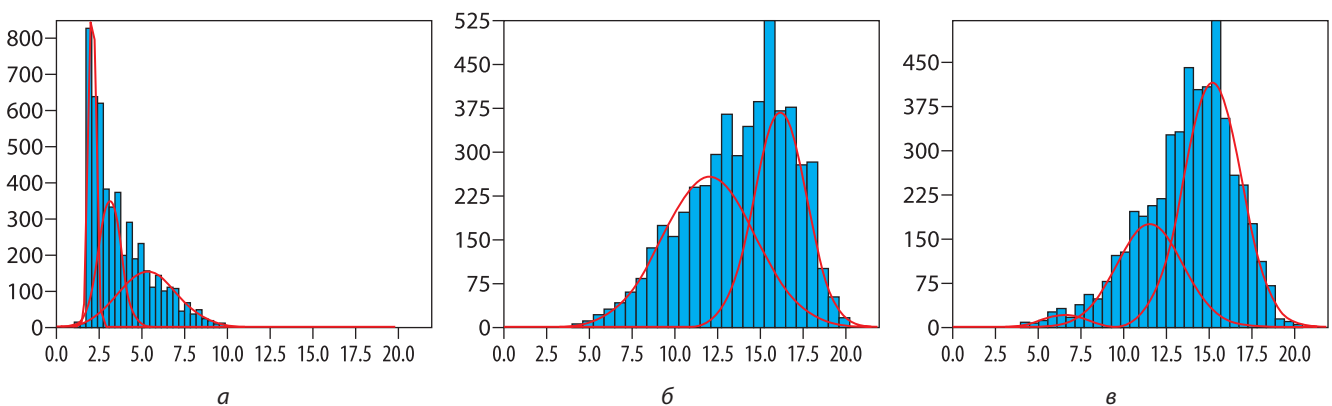


Рис. 1. Річні гістограми солоності за даними МГ Очаків (а), ОГ Південне (б) та МГ Одеса-порт (в). Горизонтальна вісь — солоність води (‰), вертикальна — кількість випадків (спостережень). Червоні лінії — функції нормального розподілу ймовірності, виділені методом аналізу суміші

Таблиця 1. Щомісячні та річні величини пропорції (P_m), середніх значень (S_m) та стандартних відхилень (σ_m) нормальних розподілів солоності річкової, проміжної та морської води за даними щоденних спостережень на МГ Очаків 1997–2010 років

| Місяць | Річкова | | | Проміжна | | | Морська | | |
|------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | P_1 | S_1 | σ_1 | P_2 | S_2 | σ_2 | P_3 | S_3 | σ_3 |
| 1 | 0,395 | 2,090 | 0,222 | 0,479 | 3,285 | 0,776 | 0,125 | 5,435 | 1,994 |
| 2 | 0,412 | 2,126 | 0,202 | 0,418 | 3,064 | 0,573 | 0,170 | 4,630 | 1,352 |
| 3 | 0,255 | 1,971 | 0,111 | 0,483 | 2,578 | 0,395 | 0,263 | 4,232 | 1,132 |
| 4 | 0,323 | 1,921 | 0,105 | 0,489 | 2,549 | 0,427 | 0,189 | 4,884 | 1,974 |
| 5 | 0,339 | 1,925 | 0,103 | 0,360 | 2,521 | 0,384 | 0,310 | 3,585 | 1,261 |
| 6 | 0,402 | 2,068 | 0,200 | — | — | — | 0,599 | 4,129 | 1,674 |
| 7 | 0,123 | 2,125 | 0,194 | 0,226 | 3,300 | 0,409 | 0,651 | 4,849 | 1,290 |
| 8 | 0,539 | 3,943 | 0,863 | 0,454 | 6,685 | 1,317 | 0,007 | 12,190 | 0,808 |
| 9 | 0,052 | 2,801 | 0,307 | — | — | — | 0,948 | 6,172 | 1,496 |
| 10 | 0,154 | 2,371 | 0,245 | 0,425 | 3,907 | 0,864 | 0,421 | 6,244 | 1,401 |
| 11 | 0,153 | 2,011 | 0,102 | 0,598 | 3,138 | 0,702 | 0,249 | 4,893 | 1,422 |
| 12 | 0,551 | 2,216 | 0,323 | 0,434 | 3,578 | 0,933 | 0,0157 | 7,695 | 2,229 |
| Рік | 0,283 | 2,086 | 0,21371 | 0,340 | 3,110 | 0,674 | 0,377 | 5,339 | 1,707 |

ляється окремим класом морська вода, натомість зростає солоність і ймовірність проміжної води.

Під час роботи з виділенням складових суміші виникало питання: якщо алгоритм АС виділяє лише дві кривих розподілу і це доводиться відповідними значеннями лог-правдоподібності і АІС, як інтерпретувати результати: відносити обидва розподіли до крайніх водних мас (річкової та морської) або одну з них — до проміжної, особливо якщо середні значення S_m є близькими до попередніх оцінок обох груп? Кінцеве рішення приймалося графічно-генетичним методом: на графіку внутрішньо-річних

(сезонних) змін S_m усі криві повинні задовольняти умові $S_3 > S_2 > S_1$. Це зрозуміло з рис. 2, де показані графіки середньої солоності складових суміші вод для усіх районів спостережень.

За даними МГ Очаків проміжна вода не виділяється у червні і вересні (табл. 1, рис. 2), але попередні і наступні значення її солоності відповідають заданій умові і тому усі криві також їй відповідають. Слід також звернути увагу на значення середньої солоності “морської” води в Очакові у серпні — 12,2‰. Хоча частка цієї складової суміші менше 1%, але суттєве збільшення солоності річкової (майже

Таблиця 2. Щомісячні та річні величини пропорції (P_m), середніх значень (S_m) та стандартних відхилень (σ_m) нормальних розподілів солоності річкової, проміжної та морської води за даними щоденних спостережень на ОГ Південне 1997–2010 років

| Місяць | Річкова | | | Проміжна | | | Морська | | |
|------------|--------------|---------------|--------------|----------|----------|------------|--------------|---------------|--------------|
| | P_1 | S_1 | σ_1 | P_2 | S_2 | σ_2 | P_3 | S_3 | σ_3 |
| 1 | — | — | — | 0,733 | 12,910 | 2,794 | 0,267 | 17,612 | 0,955 |
| 2 | — | — | — | 0,507 | 12,003 | 2,676 | 0,493 | 17,229 | 1,393 |
| 3 | 0,394 | 10,590 | 2,830 | 0,255 | 13,610 | 1,009 | 0,351 | 17,021 | 1,087 |
| 4 | 0,432 | 8,671 | 1,872 | 0,318 | 12,505 | 1,183 | 0,250 | 15,911 | 1,326 |
| 5 | 0,260 | 8,605 | 1,527 | 0,565 | 12,595 | 1,876 | 0,175 | 16,353 | 1,050 |
| 6 | 0,402 | 10,033 | 1,364 | 0,419 | 14,394 | 1,701 | 0,180 | 17,171 | 0,983 |
| 7 | 0,067 | 9,592 | 0,845 | 0,934 | 14,909 | 1,848 | — | — | — |
| 8 | 0,187 | 12,129 | 1,204 | 0,813 | 15,753 | 1,236 | — | — | — |
| 9 | 0,115 | 11,934 | 1,228 | 0,885 | 15,692 | 1,511 | — | — | — |
| 10 | 0,296 | 11,692 | 1,910 | 0,553 | 15,022 | 1,409 | 0,151 | 17,387 | 0,844 |
| 11 | 0,700 | 12,386 | 2,850 | — | — | — | 0,300 | 17,128 | 1,258 |
| 12 | 0,351 | 11,000 | 2,042 | 0,429 | 14,910 | 1,717 | 0,220 | 17,599 | 1,116 |
| Рік | 0,554 | 12,027 | 2,734 | — | — | — | 0,447 | 16,193 | 1,548 |

Таблиця 3. Щомісячні та річні величини пропорції (P_3), середніх значень (S_m) та стандартних відхилень (σ_5) нормальних розподілів солоності річкової, проміжної та морської води за даними щоденних спостережень на МГ Одеса-порт 1997–2010 років

| Місяць | Річкова | | | Проміжна | | | Морська | | |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| | P_1 | S_1 | σ_1 | P_2 | S_2 | σ_2 | P_3 | S_3 | σ_3 |
| 1 | 0,089 | 7,229 | 1,951 | 0,316 | 11,859 | 1,297 | 0,595 | 16,066 | 1,373 |
| 2 | 0,383 | 11,276 | 2,895 | 0,384 | 14,737 | 1,137 | 0,233 | 17,938 | 0,840 |
| 3 | 0,161 | 8,435 | 2,169 | 0,620 | 13,725 | 1,920 | 0,220 | 17,529 | 0,882 |
| 4 | 0,206 | 8,270 | 1,759 | 0,794 | 13,203 | 2,526 | — | — | — |
| 5 | 0,025 | 5,849 | 0,809 | 0,506 | 11,056 | 1,903 | 0,469 | 15,157 | 1,380 |
| 6 | 0,055 | 9,374 | 0,465 | 0,808 | 13,585 | 2,128 | 0,138 | 17,001 | 0,721 |
| 7 | — | — | — | 0,586 | 13,152 | 1,924 | 0,414 | 15,199 | 1,299 |
| 8 | 0,142 | 11,734 | 1,162 | 0,848 | 14,857 | 1,131 | 0,011 | 19,685 | 0,577 |
| 9 | 0,056 | 11,597 | 0,509 | 0,944 | 15,234 | 1,416 | — | — | — |
| 10 | 0,030 | 9,169 | 1,062 | 0,970 | 14,292 | 1,754 | — | — | — |
| 11 | 0,479 | 11,620 | 2,057 | 0,521 | 15,686 | 1,421 | — | — | — |
| 12 | 0,011 | 6,008 | 0,229 | 0,469 | 11,805 | 1,900 | 0,520 | 15,845 | 1,326 |
| Рік | 0,025 | 6,534 | 1,289 | 0,317 | 11,532 | 1,949 | 0,658 | 15,204 | 1,696 |

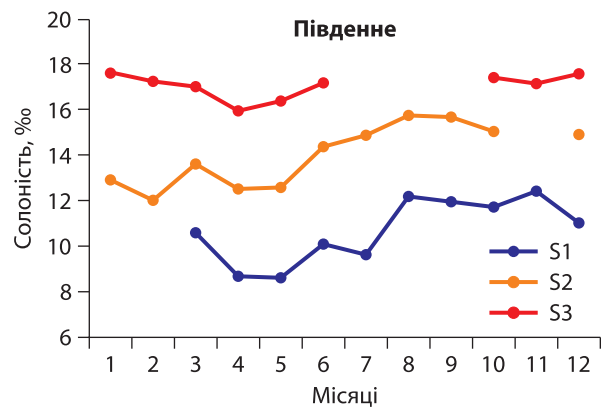
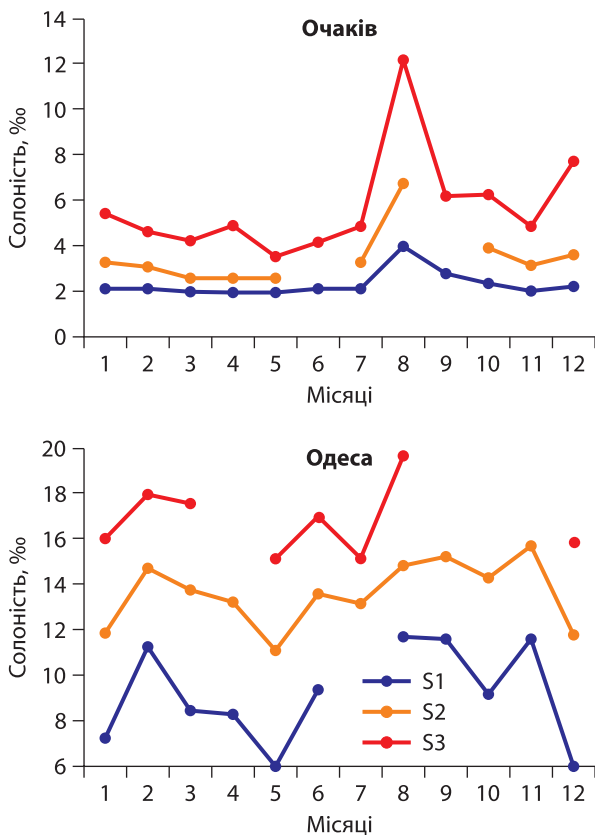


Рис. 2. Сезонний хід середньої солоності складових суміші — річкової (S_1), проміжної (S_2) та морської (S_3) вод за даними спостережень 1997–2010 років на станціях Очаків, Південне та Одеса-порт

4‰) і проміжної (6,7‰) вод доводить, що наприкінці літа відбувається зворотній рух водних мас — від моря у Дніпровсько-Бузький лиман, під впливом сезонного посилення західної складової вітру (Ільїн, 2023а). Пізніше, у вересні частка морської

води зростає до 95%, а внесок річкової зменшується до 5% і проміжна вода не простежується. У жовтні пропорція “морської” води падає до 42%, що також є відчутним внеском. При цьому середня солоність зменшується до 6,2‰ за рахунок перемішування і

утворення у жовтні-грудні проміжної води. У грудні також підвищується солоність морської води до 7,7‰, вочевидь через зменшення річкового стоку, хоча її пропорція складає лише 1,6%.

На відміну від інших районів спостережень, в Одеській затоці проміжна вода виділяється протягом усього року. Найбільш розпріснена "річкова" вода з'являється у травні, підчас середнього багаторічного максимуму стоку річок Дніпро та Південний Буг (Ільїн, 2023а). Морська вода в Одесі має найбільшу солоність 19,7 ‰ у серпні (табл. 3, рис. 2). Ця величина, типова для шару основного галокліну у глибинних районах Чорного моря, вказує на адвективне постачання морської води до шельфу ПЗЧМ у придонному шарі і виходу її на поверхню біля берегів Одеси внаслідок локального апвелінгу під дією західного вітру (Ільїн і др., 2012; Ільїн, 2023а). Втім, її частка у суміші лише 1,1%.

Солоність морської води в Одесі у середньому за рік та у більшості місяців нижче, ніж у Південному, хоча останній пункт спостережень знаходиться ближче до ДБЛ — головного джерела розпріснення на півночі ПЗЧМ. Вочевидь, дається взнаки близькість до Одеської затоки інших джерел річкової води — Дністровського лиману та навіть дельти р. Дунай, витoki з яких, за умов формування літньої антициклонічної системи вітрових течій на шельфі ПЗЧМ, досягають Одеси і навіть утворюють єдиний фронт трансформованих річкових вод, поєднуючись зі шлейфом ДБЛ (Большаков, 1970; Ільїн, 1999, 2006).

Загалом, можна стверджувати, що результати кластеризації даних спостережень методом АС за одним показником (одновимірна класифікація) дає значно більший об'єм інформації, ніж візуальний аналіз полімодальних гістограм, застосований раніше (Ільїн, 1999). За допомогою методу максимальної правдоподібності вдається виділити фізично обґрунтовані показники класів вод навіть у випадках, коли експериментальні функції розподілу є унімодальними, але їхня форма завжди дозволяє апроксимацію кількома гаусовими кривими (рис. 1). Параметри цих кривих (середні величини, стандартне відхилення та пропорція у суміші) змінюються у просторі у залежності від відстані до джерел розпріснення або осолонення, а також у часі відповідно до сезонної мінливості процесів надходження та взаємодії водних мас на шельфі ПЗЧМ.

Головними кількісними результатами роботи є дані таблиць 1–3. Їх можна використовувати з метою ймовірнісного моделювання (прогнозування) солоності води у даних пунктах як для окремих місяців, так і у цілому для року. Застосовуючи метод Монте-Карло, як в роботі (Ільїн, 2022), і задаючи

параметри нормальних розподілів із табл. 1–3, можна оцінити показники складових суміші, а потім визначити загальну солоність та її мінливість за формулами (1), (2).

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано часові ряди спостережень 1997-2010 рр. за солоністю води на станціях північного узбережжя Північно-західної частини Чорного моря на ділянці від гирла Дніпровсько-Бузького лиману (Кінбурнської протоки) до Одеської затоки. Побудовано емпіричні функції розподілу ймовірності солоності для станцій Очаків, Південне та Одеса-порт для усіх місяців і року у цілому.

2. За допомогою метода аналізу суміші виконано одновимірну кластеризацію емпіричних гістограм солоності у припущенні, що вони складаються із кількох функцій нормального розподілу, кожна з яких репрезентує окрему водну масу і характеризується своїми показниками — середньою величиною, стандартним відхиленням та часткою (пропорцією) у загальному розподілі (суміші). Для пошуку оптимальних рішень застосовано метод максимальної правдоподібності та інформаційний критерій Акаїке.

3. Експериментальним шляхом, з урахуванням особливостей динаміки вод північної частини шельфу ПЗЧМ, встановлено, що гістограми солоності можуть бути апроксимовані сукупністю 2–3 гаусових функцій. Ці функції, як правило, відповідають водам річкового походження, морського походження і проміжним водам, як результату взаємодії перших двох. Параметри апроксимації (середні величини, стандартне відхилення та пропорція в суміші) змінюються у просторі залежно від відстані до джерел розпріснення або осолонення, а також у часі відповідно до сезонної мінливості процесів постачання та взаємодії водних мас на шельфі ПЗЧМ.

4. Отримані кількісні показники складових, з яких складається водна суміш біля північних берегів ПЗЧМ, можуть використовуватися для ймовірнісного моделювання (прогнозування) солоності води в різних пунктах як для окремих місяців, так і у цілому для року, наприклад, за допомогою методу Монте-Карло.

Подяка. Дослідження здійснено в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України в рамках виконання НДР 3/22 "Динаміка перехідних вод у системах Дністровського та Дніпровсько-Бузького лиманів за даними спостережень та математичного моделювання" (2022–2024 рр., номер державної реєстрації 0122U002444).

ЛІТЕРАТУРА

- Большаков, В.С. (1970). Трансформация речных вод в Черном море. Киев: Наук. Думка. 328.
- Ильин, Ю.П. (1999). Распространение речных вод. Природные условия взморья реки Дунай и острова Змеиный / под ред. В.А. Иванова, С.В. Гошовского. Севастополь: МГИ НАНУ. 59-73.
- Ильин, Ю.П. (2006). Гидрологический режим распространения речных вод в северо-западной части Черного моря. *Наукові Праці УкрНДГМІ*, 255. 242-251.
- Ільїн, Ю.П. (2022). Середні багаторічні величини та мінливість потоків води, солі та розчинених біогенних речовин в системі Дніпровсько-Бузького лиману. *Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля*, 2. 71-80. <http://doi.org/10.15407/Meteorology2022.02.071>.
- Ільїн, Ю.П. (2023а). Середній стан та сезонна мінливість структури і динаміки перехідних вод Дніпровсько-Бузької гирлової області. *Український гідрометеорологічний журнал*, 32. 63-79. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.05>.
- Ільїн, Ю.П. (2023б). Поширення екстремального виносу вод з Дніпровського лиману в Чорне море у червні 2023 року за даними супутникових спостережень. *Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля*, 2 (4). 62-74. <https://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.062>.
- Ільїн, Ю.П., Берлінський, М.А. (2022). Балансова модель транспорту та метаболізму розчинених форм азоту і фосфору в системі Дністровського лиману. *Український гідрометеорологічний журнал*, 29. С. 59-67. <https://doi.org/10.31481/uhmj.29.2022.05>.

REFERENCES

- Bol'shakov, V.S. (1970). Transformation of riverine waters in the Black Sea. Kiev: Naukova Dumka. [in Russian]
- Ilyin, Y.P. (1999). Expansion of the riverine water. Natural conditions of the seaside of the Danube River and the Snake Island. Ivanov V.A., Goshovsky S.V. (eds). Sevastopol: MHI. 5-73. [In Russian]
- Ilyin, Y.P. (2006). Hydrological regime of riverine waters expansion in the North-Western part of the Black Sea. *Scientific works of UHMI*, 255. 242-251. [In Russian]
- Ilyin, Yu.P. (2022). Average long-term values and variability of water, salt and dissolved nutrient flows in the system of the Dnieper-Bug estuary. *Meteorology. Hydrology. Environmental monitoring*, 2. 71-80. <http://doi.org/10.15407/Meteorology2022.02.071>. [In Ukrainian]
- Ilyin, Yu.P. (2023a). Average condition and seasonal variability of the structure and dynamics of transitional waters in the Dnieper-Bug estuary region. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 32. 63-79. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.05> [In Ukrainian]
- Ilyin, Yu. (2023b). Spreading of the extreme water discharge from the Dnipro-Buh estuary into the Black Sea in June 2023 by satellite observations data. *Meteorology. Hydrology. Environmental monitoring*, 2 (4). 62-74. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.062>. [In Ukrainian]
- Ilyin, Yu.P., Berlinsky, N.A. (2022). Balance model of dissolved nitrogen and phosphorus transportation and metabolism in the Dniester estuary system. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 29. 59-67 [In Ukrainian]
- Ilyin, Y.P., Repetin, L.N., Belokopytov, V.N. et al. (2012). Hydrometeorological conditions of the Ukrainian seas. Vol. 2: The Black Sea. Sevastopol: MB UHMI. 421. [In Russian]
- Timchenko, V.M. (1990). Environmental and Hydrological Researches into the Water Bodies in the North-Western Black Sea Region. Kiev: Naukova Dumka. [in Russian]
- Tuchkovenko, Yu.S., Tuchkovenko, O.A. (2018). The model of eutrophication of marine and estuarine ecosystems in the Northwest Black Sea region. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 21. 75-89. [In Russian]
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19. 716-723.
- Dempster, A.P., Laird, N.M., Rubin, D.B. (1977). Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* 39. 1-38.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4 (1). 9 pp.
- Yankovsky, A.E., Ilyin, Y.P. (2024). The Dnipro-Buh plume: A tale of high-volume freshwater discharge in a non-tidal sea. *Continental Shelf Research*, 282. 105345. 10 pp. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2024.105345>
- Yankovsky, A.E., Lemeshko E.M., Ilyin Y.P. (2004). The Influence of Shelfbreak Forcing on the Alongshelf Penetration of the Danube buoyant water, Black Sea. *Continental Shelf Research*, 24. 1083-1098. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.007>.

Yuriy Ilyin

ORCID: 0000-0002-7717-6472

ypilyin@gmail.com

Ukrainian Hydrometeorological Institute, Kyiv

**MANIFESTATIONS OF THE INTERACTION
OF RIVERINE AND MARINE WATERS
IN THE STATISTICAL STRUCTURE OF SALINITY
BY THE OBSERVATIONS DATA
AT COASTAL STATIONS OF UKRAINE**

Time series of water salinity observations from 1997 to 2010 at marine hydrometeorological stations on the northern coast of the Northwestern Black Sea from the mouth of the Dniπρο-Buh Estuary (Kinburn Strait) to the Gulf of Odesa are analyzed. Empirical probability distribution functions of salinity were constructed for the Ochakiv, Pivdenny and Odesa-port stations for all months and year as a whole. Using the mixture analysis method, one-dimensional clustering of empirical salinity histograms is performed under the assumption that they consist of several normal distribution functions, each of which represents a separate water mass and is characterized by its own indicators — the average value, standard deviation and share (pro-

portion) in the general distribution (mixture). To search for optimal solutions, the maximum likelihood method and the Akaike information criterion were applied. Experimentally, taking into account the peculiarities of the water dynamics in the northern part of the Northwestern Black Sea shelf, it was established that salinity histograms can be approximated by a set of 2–3 Gaussian functions. These functions, as a rule, correspond to waters of river origin, marine origin and intermediate waters as a result of the interaction of the first two. The approximation parameters (mean values, standard deviation and proportion in the mixture) vary in space depending on the distance to the source of desalination or salinization, as well as in time in accordance with the seasonal variability of the processes of supply and interaction of water masses on the North-Western Black Sea shelf. Numerical indicators of the components that make up the water mixture near the northern shores of the North-Western part of the Black Sea have been obtained. They can be used for probabilistic modeling (forecasting) of water salinity at different points both for separate months and for the whole year, for example, by means the method Monte Carlo.

Keywords: water salinity, time series, river runoff, normal distribution, floating plume, transient water, sea currents.



А.В. Орещенко

ORCID:0000-0002-8363-6885
andrey_o@ukr.net

Український гідрометеоро-
логічний інститут
Державної служби України
з надзвичайних ситуацій
та НАН України

УДК 551.583:528.94+556.5:528.94+331.101.6

DOI: <https://doi.org/10.15407/Meteorology2024.06.080>

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ДО СТВОРЕННЯ ВЕБ-БАЗОВАНОВОГО АТЛАСУ “КЛІМАТ І ВОДНІ РЕСУРСИ УКРАЇНИ”

Метою цього дослідження є опис методів оптимізації процесу створення веб-базованого атласу «Клімат і водні ресурси України». Коротко викладено прогресивні методи створення веб-оболонки атласу, самих карт, складання проекту атласу і його виконання. В огляді літератури викладено особливості створення фундаментальних картографічних творів, час, затрачений на це, показано важливість використання методів оптимізації виробництва картографічної продукції. Детально описано суть серійного картографування за допомогою автоматичної картографічної системи, крупно-вузлове збирання веб-оболонки атласу, пірамідальний алгоритм розроблення проекту, скорочення кількості виробничих процесів, метод уніфікації карт, групування однакових чи подібних задач, використання «файлу скороченого технічного проекту», автоматизацію виробничих процесів, покрокове просування з попереднім визначеним результатом. У результаті використання цих та інших методів час, витрачений на розроблення атласу, скоротився із 7 тис. робочих годин до 1,5 тис. Розробку атласу завершено у 2023 році та опубліковано за посиланням: <https://maps.uhmi.org.ua>. Зроблено висновок, що ці методи оптимізації складають суперкомпетентність, відповідальну за якість і продуктивність праці. Атлас містить понад 5000 карт, більшість із яких виконано за розробленою методикою. На цих картах зображено: середню, максимальну та мінімальну температуру повітря за місяць, опади, кліматичну температурну норму, прогноз зміни клімату, хвилі холоду, тепла та різкі зміни температури повітря, а також багато інших показників.

Ключові слова: атлас, веб, методика, картографування, клімат, водні ресурси, автоматизація, оптимізація.

ВСТУП

Останніми роками наукове співтовариство демонструє постійне зростання попиту на веб-базовану цифрову кліматичну інформацію. У зв'язку з цим посилюються вимоги до нових методів і способів представлення гідрометеорологічної інформації для забезпечення галузей економіки, бізнесу, громадян України. Одним з таких методів є атласне картографування. Розроблення Атласу клімату та водних ресурсів України є необхідним кроком для забезпечення стійкого розвитку країни в умовах зміни клімату. За допомогою серій карт є можливість наочного представлення інформації не лише про основні закономірності просторового розподілу тієї чи іншої метеорологічної величини, а й відтворити найсуттєвіші деталі, зумовлені циркуляційними процесами, особливостями місцевого рельєфу, близькістю моря та іншими чинниками. Тому веб-базований атлас “Клімат і водні ресурси України” планувався як видання фундаментальної

картографічної енциклопедичної роботи загальнодержавного рівня.

Актуальність теми дослідження та її новизна полягають в узагальненні набору специфічних методів, використаних для створення такого атласу. Із досвіду розроблення картографічних продуктів можна вказати, що висвітлення у статті процесу розроблення атласу є важливим через поширення невірних з організаційної точки зору підходів, які трапляються досить часто. Більшість методик створення фундаментальних картографічних продуктів недосконалі, мають багато недоліків, а у переважній більшості випадків — взагалі відсутні. Фахівці створюють атлас так, як звикли, без теоретичного обґрунтування. Відповідно, порушуються строки видання, атлас виходить недоробленим, незакінченим, із багатьма технічними компромісами.

Проблема полягає у відсутності теоретичних знань і навичок управління проектами, а фахівці самотійно не освоювали цю дисципліну. Також вони

ніколи не займалися організацією виробництва, та навіть більше — ні разу в житті не створили закінчений прилад, інструмент, макет, тобто матеріальний продукт. Такі фахівці проєктують задачу без огляду на виробничі процеси, наявні можливості та обладнання. Без наявного досвіду і бажання розібратися із вимогами та принципами матеріального виробництва, створення фундаментального видання стає занадто працезатратним. Отже, мета цього дослідження полягає у розробленні загальних підходів до комплексування оптимізованих методів атласного картографування, використаних для веб-базованого атласу “Клімат і водні ресурси України”, що може стати методичною основою для підготовки відповідних фахівців.

ІСНУЮЧІ ПІДХОДИ ТА НАПРАЦЮВАННЯ

По-перше, видання визначних атласів, як правило, супроводжується публікаціями, з яких можемо довідатися про технології застосовані для розроблення цих картографічних творів. Зокрема, Національний атлас України містить понад 800 карт розміщених у шести тематичних блоках (Шпак, Руденко, Бочковська, 2008). Видання такого складного продукту відбувалося у 2 етапи. Перший — “ картування ” — включав авторські роботи зі створення оригіналів карт, науково-картографічне редагування і перевірку даних. Другий — “ картографування ” — створення картографічного оригіналу Атласу, підготовка його до друку і його тиражування. Над цим атласом працювали “ понад десять інститутів Національної академії наук України, кілька інститутів Академії аграрних наук України, низка провідних університетів України та науково-дослідних підрозділів ряду міністерств ”, що зазначено у роботі (Л.Г. Руденко, 2002).

Імовірно технологія роботи передбачала створення робочої групи для кожної карти або кількох карт із профільних учених і виготовлення ними авторського оригіналу. А вже фахівці Інституту географії та ДНВП “Картографія” виконували оцифрування і перенесення даних на стандартну картографічну основу, підготовку її до видання і розміщення карти у макеті атласу. Електронну версію атласу розробило ТОВ “Інтелектуальні Системи ГЕО” під керівництвом В. С. Чабанюка (Чабанюк, Дишлик, 2014; Полякова, 2010). Таким чином, над створенням атласу з 6 розділів і 865 карт працювало 3 організації (Інститут географії, ДНВП Картографія та Інтелектуальні Системи ГЕО) та було залучено ряд допоміжних установ (переважно інститути НАН України). Це дозволяє уявити обсяг роботи зі створення видання на 440 сторінок. Електронна версія НАУ,

доступна автору, в загальних рисах подібна до атласу “Клімат і водні ресурси України” за концепцією і способом реалізації.

Аналогічно, національні атласи інших держав також цінні наявністю публікацій від розробників цих творів, що дає можливість оцінити затрачений час на їх створення і співставити його із об’ємом атласу, кількістю задіяних організації, орієнтовною чисельністю працівників, залучених до видання твору. А також вивчити досвід іноземних колег, оцінити їхні зусилля затрачені на підготовку видань. Наприклад, національний атлас Литви (Krikščiūnė et al., 2019; Володченко, 2015) складається із чотирьох томів — фахівці вирішили розділити цей об’ємний проєкт на частини. Перший том було видано після 7 років роботи над ним — у 2014 р. Формат атласу 74×80 см, об’єм 142 сторінки. Видання атласу фінансується Національною геодезичною службою Литви, Міністерством сільського господарства та Вільнюським університетом. Усього перший том містить 235 карт, зазвичай на одній сторінці розміщено по 2–3 карти. Слід сказати, що через 1 рік, в 2015 р., було випущено другий том атласу, тому не всі 7 років було затрачено на створення 1 тому. Швидше 1 частина випускається за 4 роки.

Національний атлас Угорщини відрізняється від інших подібних творів наявністю трьох видань: 1964–1967 та 1983–1989 рр., а також розпочате у 2013 і закінчене у 2018, 2021 і 2024 роках відповідно (3 томи з 4-х). Тобто створення атласу не починалося без напрацювань. Останнє видання підготовлене Інститутом географії, Дослідницьким центром з астрономії та наук про Землю Угорської академії наук у партнерстві з Відділом картографії та геоінформатики університету “Eötvös Loránd”. Що вказує на подібність до вітчизняної методики організації робіт зі створення атласу (Кочіш, Немеркені, Коваль, 2016). Геопросторовий Комітет (окрема структура) відповідає за розроблення цифрової версії. В середньому Угорщина на створення 1 тому витрачає 5 років. 1 том містить близько 200 сторінок, але на них розміщені не лише карти, а й досить детальні відомості про предмет картографування. Вони включають описові, картографічні дані, наукову графіку, таблиці тощо (Kocsis, 2024). Безумовно, це один із найбільш досконалих картографічних продуктів енциклопедичного рівня.

Зазвичай оглядові статті містять відомості про структуру національних атласів, описують їх зміст (Krikščiūnė et al., 2019), проте не часто торкаються організаційних аспектів. Читач може самостійно ознайомитися із національними атласами, використавши збірку посилань на їх електронні версії

на сайті Національного атласу Угорщини (National atlases..., 2024).

Крім Національного атласу України, слід зазначити наявність першого тому Історичного атласу України (2010), автором-упорядником якого є Юрій Лоза (2013). Він був створений за 10 років (з 2000 по 2010 рр.); із структурою цього твору можна ознайомитися у праці (Пащенко, 2011). Об'єм першого тому атласу досить великий і складається з двох частин. Перша — “Залюднення українських земель у найдавніші часи” містить 24 тематичних тексти, 220 великих і малих мап і 30 хронологічних таблиць, а друга, — “Від перших слов'янських спільнот до ранньоукраїнської держави”, — 63 тематичних тексти, близько 300 різних мап та планів міст і понад 80 хронологічних та генеалогічних таблиць (Пащенко, 2012). Важливо відмітити, що найбільший об'єм роботи було виконано самим упорядником, але із залученням колективу авторів (Пащенко, 2012). Час підготовки видання (10 років) є співмірним із його якістю.

Однак більш цікавими є “національні” кліматичні атласи, яких видано значно менше, також менше і публікацій їм присвячених. Найпростіший за змістом є кліматичний атлас Литви. Як можна зрозуміти із праць (Valiukas, Galvonaitė, Česnulevičius, 2015); Galvonaitė et al., 2013), він створений із використанням ГС за даними лише кількох (п'яти) метеостанцій (Valiukas et al., 2015), але без застосування автоматизації. Усього атлас містить порядку 100 карт, розміщених на 176 сторінках, тому методика “ручного створення” є допустимою. Зі статті (Valiukas et al., 2015) зрозуміло, що робився він невеликим колективом фахівців, імовірно 5-ма фахівцями Литовської гідрометеорологічної служби.

Для повноти дослідження слід розглянути друковані видання — Словацький кліматичний атлас (Bochníček et al., 2015); Mikulová, 2016) і Кліматичний атлас Чехії (Květoň, Žák, 2007). Обидва твори створені класичними картографічними методами. Атласи містять не лише карти, але і текст, таблиці, діаграми, графіки, призначені для додаткового пояснення картографованих явищ.

Найбільш подібним за технічним завданням до авторського атласу є Цифровий атлас клімату Карпатського регіону (Antolović et al., 2013). Він є одним із кінцевих продуктів проєкту CARPATCLIM (Climate of the Carpathian Region). Вихідними даними для карт були сіткова кліматологічна база даних регіону у добовій часовій роздільній здатності за період 1961–2010 рр. із використанням просторової роздільної здатності 0,1°. Відповідно до директиви INSPIRE (Інфраструктура просторової інформації в Європейському співтоваристві),

цифровий кліматичний атлас виконаний у формі багатофункціонального веб-додатка ГС. Цей атлас подібний до атласу “Клімат і водні ресурси України” за використанням однорідних і просторово репрезентативних часових рядів кліматологічних даних покращеної якості. Вдосконалення багаторічної вихідної інформації виконувалось шляхом відновлення даних, контролю якості та гомогенізації даних за допомогою спільного програмного забезпечення MASH. Розробники врахували тривалий період часу виконання проєкту та потребу в управлінні великою кількістю даних, тому вибудували для цього спеціальну інфраструктуру. На цих підставах фахівці зменшили кількість основних метеорологічних змінних до 14: мінімальна, максимальна та середня температура повітря, опади, швидкість і напрямок вітру, тривалість сонячного сьйва, хмарний покрив, глобальна радіація, відносна вологість, тиск пари на поверхні, тиск повітря на поверхні, глибина снігу та еквівалент снігової води.

Але для самого веб-базованого атласу використали зовсім інший підхід — архітектуру клієнт-сервер, тобто як у геопорталах. Ця архітектура включала такі сервери:

- WebMapServer (Web Map Services і Web Feature Service);
- геопросторову базу даних (PostgreSQL із геопросторовим розширенням PostGIS);
- веб-сервер — складається із Carpatclim Digital Atlas Web GIS (інтерфейс користувача та управління даними) та веб-сервера IIS7 (Internet Information Services)
- сервер CSW (CatalogService for the Web) — фреймворк на основі Java з відкритим кодом Geonetwork.

Веб-ГІС-клієнт базується на технології HTML5, тобто це веб-додаток, який дозволяє користувачам візуалізувати та запитувати геопросторові дані (клієнт середньої товщини). Він покладається на фреймворк GInisWeb AJAX, веб-картографічну бібліотеку OpenLayers і OpenLayersExt і jQuery.

Все перераховане вказує на складність, якої може набути створення веб-базованого атласу. Не дивно, що до виконання цього проєкту було залучено Центральний інститут метеорології та геодинаміки, Австрія, Метеорологічну та гідрологічну службу Хорватії, Чеський гідрометеорологічний інститут, Угорську метеорологічну службу (провідна організація), Інститут метеорології та водного господарства (Польща), Національний інститут досліджень та розвитку в галузі навколишнього середовища (Румунія), Республіканську гідрометеорологічну службу Сербії, Словацький гідрометеорологічний

інститут, Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України (Київ).

Слід вказати ряд інтерактивних веб-базованих атласів, на зразок Кліматичний атлас Канарських островів (Atlas Climático de Canarias, 2024; Luque, Suarez, Hernández, 2024), або Інтерактивного атласу IPCC (IPCC WGI Interactive Atlas, 2024), які зроблені подібно, але із використанням фреймворків типу React і Vue. Як невеликий підсумок по огляду вже наявних видань: на сьогодні науково-дослідні установи видають або класичні атласи з використанням класичної картографії, або вибирають створення веб-базованих атласів, за технологіями подібних до геопорталів.

Читач, ознайомившись із вищеперерахованими продуктами, може відзначити їхню технологічність, але також їх складність, особливо для реалізації силами фактично одного фахівця у стислі терміни, а також критичність до ресурсів сервера. Із особливостями веб-картографування можна ознайомитися як у закордонних працях (Schmidt, Weiser, 2012; Veenendaal et al., 2017), так і у численних вітчизняних (Дубницький, 2017; Богданець, Ковальчук, 2014). Таким чином, веб-картографування, а, відповідно, веб-атлас відрізняється від веб-базованого атласу. Останній є істотно простішим у реалізації. У нашому випадку точніша назва створеного продукту — ГІС-атлас. Специфіка цих творів викладена у працях (Rudenko et al., 2011; Bondarenko, 2011).

Однією із найбільш фундаментальних праць є монографія Чабанюка В.С. (2018), у якій розглянуто поняття атласної платформи і сучасні атласні архітектури, на прикладі Національного атласу Нідерландів, Швейцарської атласної платформи, Атласу надзвичайних ситуацій України, а також досвід створення електронних атласних систем за 25 років. Автор вказує на триваліший час розроблення Національного атласу України — з 1999 по 2010 р., тобто 12 років із залученням великого колективу фахівців. Перші атласні платформи, розроблені В.С. Чабанюком, не істотно перевершують Атлас “Клімат і водні ресурси України”.

Потрібно також розглянути праці про розвиток картографування в Україні, що дозволить оцінити наявні методи оптимізації виробництва. Найперше, виділяється етап переходу на цифрові (комп’ютерні) технології, проте у цих працях немає матеріалу про оптимізацію картографічного виробництва (Руденко, Поливач, 2011; Сосса, 2009; Сосса, 2011). Насправді ця галузь за понад 300 років свого розвитку досягла високого рівня виробничої оптимізації і подальші розробки зіштовхуються із великими труднощами. Останні пов’язані з тим, що у складанні

друкованої атласної продукції дуже важко віднайти нові високопродуктивні методи роботи. Ефективність зберігається на прийнятному рівні за рахунок розподілу праці.

Якщо здійснювати пошук статей, які подібні до даного дослідження за назвою, то в цих працях автори не розкривають специфіки оптимізації виробничих процесів (Krylov et al., 2019), розробки теорії і методів автоматизації процесів картографування атласів. Автори зазвичай описують: розроблення оптимальної структури атласу; задання його математичної основи; формалізацію створення географічної бази карт для атласу; формування та візуалізацію довідкової інформації атласу; організацію, зберігання та використання просторово-тимчасових даних в електронних атласах. Це у роботі не допомагає. Також є статті про організацію картографічного виробництва: графічного інтерфейсу користувача (Logiнов, 2023), розроблення багаточільового картографічного ресурсу (Yankelevich, 2023), що теж не просуває у вирішенні задачі.

Так, є ряд статей, які використовують оптимізацію окремих виробничих процесів під час створення карт. Зокрема, автори публікації (Brooks, 2000) використовують скрипт для проведення генералізації. Але цю технологію студенти зараз освоюють на 3-му або 4-му курсах профільних кафедр. Відповідно, із автоматизації створення карт і опрацювання геоданих у ГІС є ряд книг (McPherson, 2017; Toms, O’Beirne, 2017; Toms, Parker B. et al., 2022). З теорії картографії виділяється стаття (Pawlowski et al., 2016), в якій роз’яснено способи картографічного зображення і їх правильне застосування на картах, створених в ArcGIS.

Найкращі статті було знайдено за пошуковим запитом “map production workflows”. Наприклад, стаття (Buckley, Watkins, 2009) досконало описує теорію автоматичного картографування в ArcGIS, яка була застосована автором.

Як підсумок, можна вказати, що тема оптимізації та автоматизації картографічних робіт загалом у відомих автору публікаціях не розкрита. Так, відносно добре викладено роботу в ArcGIS, але немає цілісної концепції створення автоматичних карт. Як і загалом теорії атласного картографування, яка б описувала правильний процес видання атласів. Тобто, станом на зараз немає дослідження, яке б дало змогу раціонально вирішити актуальну задачу: *запропонувати хорошу, продуктивну методіку створення веб-базованого тематичного атласу, що дозволить вкластися не в шість тисяч годин а в півтори. Отже, нагальним є завдання щодо оптимізації частин продуктивної методіки створення веб-базованого атласу.*

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Перш за все було використано власний досвід автора атласного картографування та розроблення великих проєктів. Слід сказати про три Альбоми демаркації державного кордону між Україною і Республікою Молдова. Кожен із них містив більше 100 карт, на яких детально показано проходження лінії кордону по топографічній карті масштабу 1 : 10 000. Специфіка їх виконання полягає у дуже складній процедурі оптимізації створення, оскільки всі прикордонні знаки наносяться вручну, керуючись нормативними документами. Крім того, були процеси, швидкість виконання яких залежала від швидкодії обладнання, тому прискорити їх було неможливо. Наприклад, сканування карт потребувало до 10 хвилин на 1 карту. Для прискорення виконання всі роботи було розподілено на “мікро-конвеєри”: поки обладнання виконувало один процес, оператор виконував інший. Наприклад, під час сканування карт виконувалося їх вирівнювання по тону у растровому редакторі. Перед друком карт здійснювалася їх підготовка — видалення артефактів експорту в растри. Також вдалося відмовитися від повноцінної підготовки до друку карт, як це прийнято на картографічному виробництві. Також використовували оптимізацію підготовки даних — один масив значків замість 256. Це приводило до появи артефактів на кінцевих картах, які можна було швидко прибрати, замість використання понад 300 наборів даних для кожної карти.

Ще один важливий досвід — це розроблення Проєкту винесення лінії україно-молдовського кордону. Унікальність проєкту полягає у створенні чотирьох тисяч (!) складних документів — протоколів прикордонних знаків. Кожний протокол містив космічний знімок прикордонного знаку, графічну схему проходження кордону по цій ділянці, опис проходження кордону і опис розташування прикордонного знаку, його координати в таблиці, та ряд інших відомостей на 2 сторінки формату А4. За день у фахівця виходило створити не більше 4–5 протоколів. Слід врахувати, що протоколи могли бути одним із 4-х типів: на річкові, перехідні, проміжні та основні знаки, які відрізнялися між собою суттєво. Для підготовки цих протоколів була створена спеціальна програма на Visual Basic, яка брала дані із бази MS Access (координати, текстовий опис, шлях до файлу) і формувала послідовно всі документи протоколів шляхом заміни шаблонних ділянок на відомості із полів бази даних. У результаті програма формувала закінчені протоколи, які містили як текст і таблиці, так і графічні зображення (створені раніше і розміщені в папках). Відповідно, всі 4 тисячі протоколів можна було сформувавши за кілька днів.

Також використовувався *аналіз специфіки створення фундаментальних атласів*. Наприклад, для розроблення Національного атласу України було задіяно багато робочих груп, утворених із вчених профільних галузей. Саме вони створили карти і описи відповідно до початкової концепції і технічного завдання. Після нанесення на стандартну картографічну основу одного із обраних масштабів обов’язково виконувалося рецензування і редагування фахівцями Інституту географії НАН України.

Це вказує на об’єм роботи, а також на шляхи пошуку рішень оптимізації задачі. Наприклад, якщо розглянути атлас не як цілісний твір, а як набір карт, (90% роботи по атласу), то виявиться, що більшість карт у загальних рисах подібні між собою, відрізняються тільки тематичним навантаженням, а їх кількість характерна для дрібносерійного виробництва. Їх виготовлення нагадує виробничі процеси у автомобільній промисловості, але, звісно, у меншому масштабі. Відповідно, можна перенести методи оптимізації, характерні для цього типу виробництва, на картографічні процеси. Наприклад, “метод переведення дрібносерійного виробництва у великосерійне” шляхом уніфікації карти та її відповідної модифікації, спрощення деяких виробничих процесів можна застосувати для досягнення максимального рівня автоматизації. На відео (Volkswagen Phaeton..., 2015) можна побачити недостатньо ефективні процеси створення однойменного автомобіля. І практично повну автоматизацію на конвеєрах серійних авто, до чого слід прямувати.

З аналізу досвіду фахівців Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України, набутого під час складання звіту про науково-технічну роботу (Балабух та ін., 2016), виділено певні сильні сторони та прорахунки в організації робочого процесу. Зокрема, спеціалізація фахівців на створенні компонентів атласу і підготовчих роботах дозволила відносно раціонально використати знання та навички фахівців. З іншого боку, такий підхід привів до несиметричного навантаження на фахівців відділу.

Автор проводив вимірювання часу за методикою Олександра Любищева, тобто записував дані про виконану роботу у спеціальній формі із вказанням початку і кінця виконання задачі, і витрат часу в хвилинах. Ця методика описана в працях (Любищев, 1976; Гранин, 1974). Однак робота над багатьма проєктами одночасно, відповідно потреба використовувати одні і ті ж результати багаторазово і зводити кілька задач в одну дозволяє досить приблизно оцінити час, витрачений на атлас.

Окремо слід зазначити, що успішність оптимізації методик залежить не тільки від знання карто-

графічного виробництва. Ця діяльність більшою мірою вивчається когнітивістикою — науковою дисципліною про процеси мислення і природу людського знання (Онопрієнко, 2011). Робіт у цій галузі досить багато, але слід вказати найбільш визначні. Із технічної творчості можна відмітити Генріха Альштуллера (1969, 1979), технічну творчість (Шило та ін., 2008), винахідництво (Уилсон, 1975). Також слід відзначити власне ряд праць в цій науці (Thagard, 2005; Dehaene, 2020), у тому числі фундаментальних (Friedenberg, Silverman, 2006) і використання когнітивних платформ (Georgiadis K. et al., 2022; Mathews, 2008; McCarthy et al., 2025). Лідером за кількістю праць із когнітивістики є Китай, зокрема Китайська академія наук, фахівці якої виділяють кілька етапів розвитку когнітивної науки, які називають “поколіннями” (generations) (Чен Вей, 2024; Дай Рувей і Чжан Леймін, 2010; Ян Нін, Чжуан Бі, 2015). Бібліографія цих статей подана в українському й англійському перекладі з китайської.

ЕЛЕМЕНТИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ОПТИМІЗАЦІЇ

Сам атлас розміщений за посиланням <https://maps.uhmi.org.ua>. Далі по тексту узагальнено власне методи оптимізації, використані для створення атласу.

На початку слід вказати **метод проектування продукту у відповідності до наявних технологій**. А також **модифікацію продукту для приведення його промислового дизайну у відповідність із доступним оснащенням**. В нашому випадку було застосоване скорочення кількості тем атласу і збільшення кількості карт, оскільки такий підхід дозволив більш детально передати кожну тему та економив час на розробленні шаблонів менш важливих тем. Оскільки кожна тема атласу потребує виконання комплексу робіт зі створення тематичного шаблону карти, розроблення легенди, системи умовних позначень. На той час вже була створена автоматична картографічна система (у загальних рисах).

Логічно, що найбільш продуктивним став **метод серійного картографування за допомогою автоматичної картографічної системи**. Ще до початку роботи над атласом було вирішено використовувати серії карт — тобто набори аналітичних карт, кожна з яких відображає один і той самий показник картографування, із різницею у часі. Серію однакових карт можна створити швидше, ніж таку ж кількість різних за змістом. Проте справжнім досягненням стала можливість автоматизованого створення серій карт.

Найбільшою проблемою у серійному картографуванні є правильна передача великої кількості

градацій картографічного показника. Наприклад, температуру повітря доцільно зображувати через 1°C. Але середньомісячна температура повітря на території України може змінюватися від приблизно -20°C до +30°C і вище. Спосіб картограми передбачає зміну інтенсивності (яскравості) або світлоти (кількості білого в кольорі) одного кольорового тону, але не зміну останнього. Навіть, якщо застосувати різні значення кольорового тону (синій і червоний) для температур нижче і вище 0°C, передати відразу 30 градацій буде неможливо. З використанням ізоліній з пошаровим зафарбуванням можна вийти із ситуації, використавши підписи ізотерм, але це все-одно некоректно. Під час прочитання карти буде складно розрізнити градації. Використання різних штриховок, наприклад, для зображення непарних значень температур, теж не відповідає теорії картографії. Автором свого часу, як варіант, було запропоновано використання динамічних шкал, коли градації показника для певної карти займають приблизно 70% динамічного діапазону графічної змінної, а решта — 30% — витрачається на “позиціонування” карти в межах серії карт. Іншими словами, на конкретній карті температура не змінюватиметься від 1°C до 30°C, а, орієнтовно, від +20°C до +32°C, що можна передати інтенсивністю відтінку кольору. А початковий і кінцевий відтінки вказуватимуть, що карта передає високі температури.

Теоретично “метод динамічної шкали” міг працювати, однак програмно він реалізується складно — не просто написати алгоритм вибору шкали залежно від значень показника. Однак саме аналіз цього методу привів до використання наступного: створення серій карт для лише обраних значень показника, які потрапляють у певний діапазон значень. Наприклад, для літніх місяців можна використовувати одну легенду, а для осінніх і весняних — іншу. Насправді градацій для серій карт за 1946–2020 рр. потрібно більше, ніж 4, оскільки для холодних зим потрібна одна шкала, а для теплих — інша. Аналогічно для літніх місяців. Таким чином, можна створити близько 7 серій карт із різними шкалами для різних діапазонів показника, а потім вибрати карти, які найкраще розкриті певною шкалою.

Створення серій карт було реалізовано за допомогою скрипту на мовах Python і ArcPy, які здійснювали перерахунок показника і створення на його основі Share-файлу. Останній заміняв відповідний стандартний файл показника у шаблоні. Якщо відкрити шаблон, карта буде перерисована із урахуванням нових значень. Однак у середовищі ArcPy карту не потрібно відкривати у геоінформаційній

системі, її оновлений шаблон може бути експортований у зображення на пряму. Відповідно, цикл на мовах Python + ArcPy дозволив виводити за один підхід сотні карт. Наприклад, серія “Середня максимальна температура повітря за місяць, зима 1946–2020 рр.” містить 225 карт. А кількість карт для цього показника за всі сезони і місяці складає 900!

Автор підрахував, що на одну серію карт витрачалося близько 1–2 робочих днів (багато часу йшло на підготовку шаблону, модифікацію скрипту тощо). Та і сам процес обчислення на досить потужному комп’ютері тривав понад 40 хв. Тим не менше, це досить висока продуктивність.

За цією методикою було створено карти температур повітря, опадів, їх кліматичних норм та аномалій, а також проєкцій цих показників, що було доволі просто. Більш складним був алгоритм створення серій карт хвиль тепла та різких змін температури. Такі карти містять два показника, один із яких відображається за допомогою штрихування. Найбільш складно реалізувати саме штриховку, оскільки нею можуть бути залиті лише векторні області. Тому, виконавши інтерполяцію значень показника, отримували растр, останній “децимували”,

тобто перетворювали його значення на цілі числа, потім утворювали векторні фігури автоматичним оцифруванням. Лише останні могли бути заштриховані під час перескладання карти.

Пов’язаний із попереднім **метод уніфікації карт** передбачає використання однакових способів і засобів картографічного зображення, методів картографування, картографічних основ, програмного забезпечення для різних карт. Цей спосіб широко використовується у сучасному виробництві: особливо це помітно на прикладі електричних інструментів різних виробників: зовні абсолютно однакові, вони можуть відрізнятися лише окремими комплектуючими.

Для створення більшості карт Атласу використовувалася одна картографічна основа (загальногеографічна масштабу 1:5 000 000, *рис. 1*), інші автори карт використовували власні напрацювання, наприклад, Світлана Савчук — оглядову 1:10 000 000 і оглядову 1:6 000 000.

Для відображення картографічного показника використовувався спосіб картограми з одиницею картографування трапецією, обмеженою значеннями широти і довготи 0,1x0,1°. Він дозволяв згладити

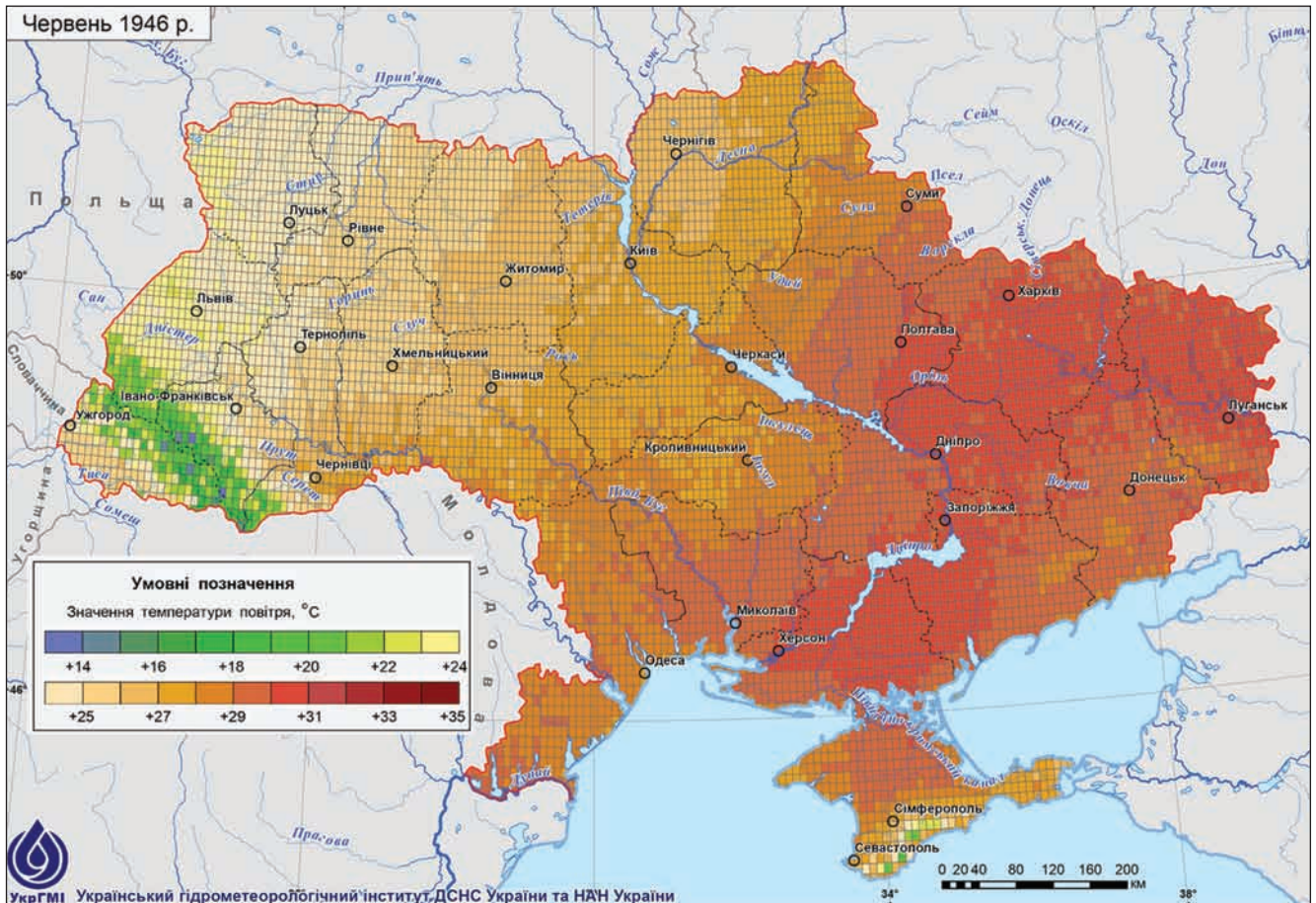


Рис. 1. Уніфікована картографічна основа. Середня максимальна температура за червень 1946 р.

кривизну ізотерм, які виникали під час інтерполяції даних. Крім того, саме в такому форматі (у вигляді сітки $0,1 \times 0,1^\circ$) були надані вихідні дані температури повітря і опадів. Цей спосіб не потребує ручного редагування закінчених карт.

Скорочення кількості виробничих процесів.

Класичний процес створення тематичної карти передбачає: підготовку даних (1), їх опрацювання картографічними методами: інтерполяцію, проведення ізоліній, застосування умовних позначень (2), створення тематичних шарів і підписів у ГІС (3), перенесення їх на картографічну підкладку у векторному редакторі (4), редагування неточностей і підготовку до друку карти (5).

Для того, щоб позбавитися процесів (4) і (5), було створено спеціальну картографічну основу. Остання містила контури, підписи географічних об'єктів, особливо річок, зовнішнє оформлення у такому вигляді, щоб експорт карти у растр коректно зберігав товщини та розташування таких об'єктів. Наприклад, річки були розділені на фрагменти і для кожного з них задана товщина таким чином, щоб забезпечити динамічний ефект (різна товщина русла річки від витoku до гирла). Штрихові лінії в полігонах накладатимуться одна на одну прозорими ділянками зі спотворенням умовного позначення, тому всі полігони областей були замінені на фрагменти поліліній. Також було виконано ручне згладжування контурів природних об'єктів. Елементи оформлення, на зразок логотипу Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України, були включені у шаблон карти як векторні об'єкти. Все це дозволило під час експорту карти отримувати растровий рисунок, який не відрізняється за якістю від експортованого із векторного редактора. А згладжування контурів, недоступне в ГІС, було реалізоване шляхом пакетного зниження роздільної здатності рисунків у редакторі растрової графіки зі згладжуванням пікселів. Таким чином, якісна картографічна основа у ГІС дозволила відмовитися від двох останніх процесів створення карт. Від підготовки даних (1), опрацювання останніх (2) і створення шарів (3) відмовитися неможливо, однак ці процеси добре автоматизуються, що описано вище.

Використання вже готових напрацювань мало обмежене застосовування. Так, деякі модулі раніше розробленої Системи моніторингу викидів тепла і виявлення потенційно небезпечних пожеж підійшли до Автоматичної картографічної системи. Певні напрацювання із веб-інтерфейсу Геопорталу гідрометеорологічного прогнозування також перейшли в атлас — використовувалися для створення веб-оболонки атласу. Так, багато робіт ґрун-

туються на раніше розроблених проєктах проте створення Веб-базованого атласу було унікальною задачею. Відповідно, використовувалася свого роду варіація цього методу, або новий метод оптимізації, викладений нижче. Він полягав у пошуку потрібних напрацювань і їх інтеграції у проєкт.

Крупно-вузлове збирання (веб-оболонки атласу і модулів на Python). Одним із компонентів веб-базованого атласу є веб-оболонка. Остання — це не тільки сайт атласу, на якому викладено його опис, функції, зміст тощо, а і програмне забезпечення, яке дозволяє користуватися атласом, розкривати його зміст, переглядати карти. Це окремий продукт, досить складний у створенні. На якісно розроблений ресурс можна витратити багато часу, близько півроку. Головною проблемою є не контент (корисний вміст сайту), а саме його структура, базовий дизайн веб-оболонки.

Вивчаючи досвід створення веб-сайтів компаніями, які на цьому спеціалізуються, перш за все слід відзначити використання власних напрацювань, — їхні сайти інколи подібні. Також вони використовують відкриті напрацювання, наприклад, у вигляді шаблонів для CMS (Content Management System — Систем управління контентом, на зразок WordPress). Тому фірма, яка спеціалізується на створенні веб-сайтів, створює їх досить швидко. Однак ці сайти редагувати важко, а у випадку використання CMS або фреймворків — фактично неможливо.

Також слід відзначити, що фахівці зі створення сайтів навчаються цій професії роками, і мають спеціалізацію всередині професії.

Задача зі створення веб-оболонки атласу примітна тим, що потрібно за короткий термін (2–3 місяці) розробити веб-оболонку високої якості, на рівні продуктів, створених фахівцями закордонних установ, які належать до цієї ж галузі. Крім того, це потрібно зробити силами одного фахівця, який практично ніколи не працював над веб-дизайном. Також цей продукт повинен підлягати суттєвому редагуванню.

Виконується це завдання шляхом поєднання відкритих фрагментів розмітки і Java-скриптів. Автором було знайдено шаблон односторінкового сайту-лендінгу із чітко прописаними секціями, вміст яких легко редагувати. У секціях були розміщені фрагменти коду, які опубліковані для вільного доступу, такі як "каруселі" (зображення, які змінюють одне одного), Google-карти, html-форми тощо. Ті компоненти, яких не вистачало, вдалося знайти на сторонніх ресурсах. Вони доповнили лендінг функціональними елементами. Тобто виконано наповнення секцій готовими функціональними блоками (комбінаціями HTML, CSS і Java-Script).

Як можна зрозуміти із вищевикладеного, весь програмний код і розмітка створювалися у текстовому редакторі, точніше, в ньому виконувалося редагування і поєднання частин коду та розмітки. Таким чином було отримано доступ до низькорівневих функцій і налаштувань. Спеціальні редактори HTML-розмітки, на зразок DreamViewer, фреймворки (Vue.js) або CMS не використовувалися.

Шляхом поєднання кількох веб-сторінок у фреймах створювалася і сторінка-меню, тобто зміст атласу. Власне саме меню — це одна веб-сторінка (лівий фрейм), за допомогою якої можна відкрити певний підрозділ атласу — ще одну веб-сторінку у правому фреймі. Остання містить набори карт, а також їхній в'ювер. Верхній фрейм — це головне меню атласу.

Окрему сторінку для кожного фрейму створити простіше, ніж все одразу. Хоча такий спосіб вважають застарілим. Меню одного фрейму дає змогу завантажувати сторінки в іншому, відповідно, кожна веб-сторінка зберігається в єдиному примірнику.

Крупновузлове збирання застосоване для створення в'ювера карт — спеціальної програми на Java-Script, яка використовується як для відображення мініатюр карт на веб-сторінці, так і для виведення на екран окремої карти по кліку. Функціонал в'ювера не обмежується відображенням карт на екрані, а й дозволяє виконувати нескладні маніпуляції з ними: масштабувати, розвертати, пересувати по екрану.

Сам в'ювер було складено із двох частин. Перша — призначена для створення мозаїки зображень із списку посилань на файли карт, друга — для виведення вибраного зображення на екран, в окремому діалоговому вікні, а також виконання маніпуляцій із ним. Ці частини було поєднано таким способом: у файлі html із мозаїкою карт розміщено посилання на файл Java-Script із другою частиною в'ювера.

Групування однакових чи подібних задач. Для створення веб-базованого атласу потрібні фахівці кількох неспоріднених спеціальностей. Це векторна (класична) картографія, дизайн, html-верстка, програмування на Python, ArcPy і Java-Script, — це 3 різних фахівці а також робота в геоінформаційних системах. Цілком логічно об'єднати, скажімо, створення усіх карт в одну групу задач, і виконати її за один "підхід". А також розробити всі скрипти за одну "робочу сесію". У подальшому в процесі роботи зі скриптами потрібно буде замінити лише імена вихідних файлів. Це дозволить не перемикатися між складними задачами, а, закінчивши одну групу задач, перейти до іншої.

Насправді використання цього методу не обмежується лише на рівні професій. Збільшити ефективність можна шляхом розподілу задач на операції і групування останніх, якщо вони подібні. Наприклад, у створенні серій карт є операція із конвертації геопросторових даних у формат Shape. Цілком природно виконати всі такі задачі за один підхід.

Для збільшення продуктивності праці використовувався *ряд методів, пов'язаних із високопродуктивним обладнанням*. Зокрема, використовувався комп'ютер із трьома моніторами, щоб не витрачати час і увагу на перемикання між програмами. Програмована клавіатура і миша дозволили виконувати складні команди одним натисненням відповідної кнопки. Переносний жорсткий диск слугував для верифікації файлів між різними комп'ютерами.

Використання "файлу скороченого технічного проекту" дозволяє записати особливості реалізації проекту, щоб не забути про них. Також містить відомості про вже реалізовані і актуальну задачу. Це важливо, оскільки робота велася паралельно над кількома проектами. І головне — слід було записати відносно детальний перелік задач, які ще залишилися. Це дозволяло без втрати продуктивності вибирати задачі для виконання, якщо робота над актуальною зупинялася. Особливістю цього "файлу" є відносно більша деталізація у порівнянні із звичайними записами, і їхня структурованість.

Автоматизація виробничих процесів. Включає цілий ряд "лайфхаків", які дозволяють прискорити в рази виконання повторюваних процесів. Останніх в Атласі доволі багато. Атлас "Клімат і водні ресурси", як можна побачити, складається із багатьох однакових структурних компонентів (деталей). Наприклад, атлас містить понад 3 тисячі карт, які схожі, така ж кількість мініатюр карт, створених переважно із їх повнорозмірних файлів. У веб-оболонці атласу є понад два десятки веб-сторінок, які відрізняються лише заголовком і вмістом карт; в усьому іншому (структура, метадані) вони подібні. Створення однакових компонентів містить виробничі процеси, які підлягають оптимізації та автоматизації. А саме:

- за допомогою скриптів у редакторах растрової графіки можна створювати мініатюри карт пакетним чином. Вся папка із файлами може бути опрацьована за одну робочу сесію — 10–20 хв;
- розмітку веб-сторінок атласу, які містять карти, можна створити за допомогою електронної таблиці на зразок Excel. Дійсно, головний блок розмітки — це в'ювер карт, точніше, таблиця мініатюр карт, які кліком відкриваються у в'ювері.

Сама таблиця містить опис карти, посилання на карту-мініатюру і на повну версію карти, та елементи оформлення. Якщо кожній такій карті відвести рядок в файлі Excel, то в певні комірки можна занести регулярні блоки тексту — елементи розмітки, а в інші — посилання на карти, скажімо. Список посилань на карти можна отримати із файлового менеджера (програми) на зразок Total Commander. Ці посилання можна вставити списком у файл, і тоді карти відкриватимуться у тому ж порядку, в якому вони розміщені в папках. В нашому випадку вони розмістяться в алфавітному порядку. Скопіювавши отримані рядки з файлу Excel у файл HTML у текстовому редакторі, можна створити майже готову веб-сторінку з картами;

- створення серій карт, викладене вище по тексту, також входить до цього пункту;
- підготовка і попереднє опрацювання даних передбачає, зокрема, обчислення сум. Це стандартні функції електронних таблиць.

Всі ці методи оптимізації не обмежуються перерахованими вище; останні наведені швидше для ознайомлення, ніж для подання вичерпного переліку. Лише досвід і постійний пошук оптимізації задач приводить до швидкого їх виконання.

Алгоритм **"покрокового просування з попереднім визначенням результатом"** застосовувався для вирішення складних задач із негарантованим результатом, наприклад, розроблення Автоматичної картографічної системи. Остання використовувалася для створення серій карт. Суть проблеми у тому, що розроблення складної задачі непрофільним фахівцем (непрофесіоналом) часто вражає непродуктивне або неуспішне через виникнення проблем (як правило, кількох), які не вдалося вирішити. Вони відомі фахівцеві із чималим досвідом роботи, але не описані у відповідній літературі. Та й усі подібні випадки неможливо описати.

Суть проблеми у тому, що алгоритм дій непрофільного фахівця нагадує методику "виїдання дірок у сирі", тобто вирішення проблем, які можна вирішити. У результаті залишаються невирішені складні питання, вже недоступні для фахівця. Все це через невірну методику виконання роботи, яка на початку вже містила потенційно не вирішувані задачі. Однак нефахівець у цій галузі не знає про це.

Більш досконалою є методика "покрокового просування з попереднім визначенням результатом". Її суть можна описати як "невеликі кроки у напрямку до мети". Тобто алгоритм полягає у виділенні завдання, яке можна виконати наявними уміньми і засобами. Після його вирішення намічається наступне. У випадку складнощів, які не вдається по-

долати, розробляється новий ланцюжок або нова методика. Перевагою такого підходу є відсутність втрат часу на вирішення проміжних завдань, які потім не знайдуть свого застосування.

Пірамідальний алгоритм реалізації проекту дозволяє створити невеликий за об'ємом роботи, але працюючий результат, що передбачає можливе подальше дооснащення і розширення функціоналу. Тобто мова йде про забезпечення можливості масштабування системи, коли успішно працюючий прототип розширюється до її повноцінної версії. Наприклад, веб-сторінки, зроблені із поєднанням технологій HTML, CSS і JavaScript, можна допрацьовувати із мінімальними навичками веб-дизайну, рівно як і дооснащувати готовими великими функціональними блоками. У той же час радикально вдосконалити шаблон на WordPress доволі складно — для цього потрібно добре розумітися на мові PHP. Таким чином, простота реалізації задачі у поєднанні з правильним вибором моделі вирішення задачі забезпечує гнучкість і вчасне закінчення та здачу проекту.

Суть пірамідального алгоритму досить специфічна. Дійсно, проект продукту можна скласти так, щоб цей продукт передбачав можливість його вдосконалення. І реалізовувати його за проектом — виконати перш за все фундаментальні блоки, а потім другорядні. Тобто реалізовувати покроково. В той же час пірамідальний алгоритм призначений для покращення якості виконання задачі, вже спроектованої заздалегідь, наприклад керівником або замовником. Проект дійсно простіше виконати лінійно, поетапно, в той же час виділення важливих етапів дозволяє створити працюючий прототип, виконати корекцію, а вже потім дооснащувати його. Також існує імовірність непрацездатності реалізації проекту, тому пірамідальний алгоритм дозволяє швидше виявити помилку.

Всі ці методи стають доступними, точніше, розроблення таких методів стає можливим із **використанням когнітивної платформи третього покоління**. Когнітивна платформа — це набір правил, які описують методи отримання, запам'ятовування, узагальнення у вигляді досвіду та використання знань, умінь і навичок. Одним із призначень когнітивної платформи є забезпечення можливості суміщення кількох різномірних професій, які належать до кількох напрямків. В даному випадку графічного і веб-дизайну, картографії, програмування на java-script, Python і ArcPy. А також оптимізації виробництва та управління проектами. Якщо коротко, це реалізується шляхом відокремлення професійних знань, умінь, навичок від уніфікованих (пошук інформації, творчість, умінь вирішувати

задачу), інструментальних (уміння навчатися, використовувати знання, особливо з інших сфер) та управляючих (фундаментальних, на зразок власне системи розподілу на знання, уміння, навички, і їх призначення, власне “ядро” когнітивної платформи). Інструментальні методи, які входять у “комплект” когнітивної платформи, дозволяють розроблювати такі методи оптимізації.

ВИСНОВКИ

Під час створення атласу була використана прогресивна методика, яка включала методи оптимізації атласного картографування з використанням спеціальних конфігурацій обладнання (трьох моніторів, програмованої миші, клавіатури), скриптів для програмного забезпечення (растрового редактора, електронної таблиці), програмування (створення автоматичної картографічної системи), організаційних підходів і управління проектами (уніфікації, крупно-вузлового збирання, пірамідального алгоритму, файлу скороченого проєкту) та інструментальних технологій (використання когнітивної платформи)

Усі ці методи та суттєва модернізація методики створення карт за допомогою описаних вище прийомів і технологій дозволили зменшити об'єм робіт із орієнтовно 7–8 тисяч людино-годин до порядку 1,5–2 тисяч. Орієнтовно на розроблення веб-оболонки було витрачено 300–400 годин, на створення серій карт — приблизно 500.

До останнього процесу входять як розроблення скриптів, картографічної основи для ГС, підготовка даних для картографування (проміжні розрахунки), та і проміжних даних і виконання скриптів. Верстка

всіх уже готових компонентів у єдиний сайт теж зайняла порядку 300 годин.

Всі перераховані методи можна поділити на методи проєктування (продукту, алгоритму) і на методи реалізації (проєкту). До останніх належать спеціальне обладнання, пірамідальний алгоритм, покрокове просування, скрипти для програм, автоматична картографічна система та інші. Методи проєктування — це власне розроблення концепції продукту і його модифікація у відповідності до наявних технологій, наприклад, серійного картографування, уніфікація карт та деякі інші.

Із викладеного матеріалу, — по самих методах, ми можемо побачити наскільки складним є розроблення правильної методики виготовлення продукту. Для класичного атласного картографування характерною є трудомісткість, у той же час сучасні підходи значно скорочують час на виготовлення таких фундаментальних творів. Усі ці методи є результатами роботи одного із “функціональних блоків”, які в свою чергу входять до складу суперкомпетенції “Якість і продуктивність праці”. Цей блок “Організація виробництва і проєктування методики” доповнюється, наприклад, іншим блоком, який відповідає власне за продуктивне виконання роботи, а також іншими структурними блоками. А сам метод оптимізації конкретно для атласу реалізується базовою одиницею суперкомпетенції.

Дослідження виконано в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України в рамках НДР № 10/21 “Розроблення та видання електронного атласу “Клімат і водні ресурси України”. Номер державної реєстрації: 0121 U110241.

ЛІТЕРАТУРА

- Альтшуллер, Г.С. (1969). Алгоритм изобретения. М.: Московский рабочий, 1969. 63 с.
- Альтшуллер, Г.С. (1979). Творчество как точная наука. М.: Сов. радио, 1979. 105 с.
- Балабух, В.О., Дмитренко, В.П., Краковська, С.В. (2016). Кількісна оцінка та прогнозування стану кліматичної системи за даними спостережень та даних регіональних кліматичних моделей: Звіт про науково-технічну роботу. Під кер. В.І. Осадчого. Київ: УкрГМІ, 202 с.
- Богданець, В.А., Ковальчук, І.П. (2014). Електронні атласи: минуле та сьогодення. *Часопис картографії*, 11 (2014), 194–215.
- Бондаренко, Е.Л. (2011). Геоінформаційне картографування як сучасна технологія автоматизованого створення картографічних творів. *Часопис картографії*. 3. 168–176.
- Володченко, А. (2015). Національний Атлас Литви, т. 1 (2014 р.). *Геоконтекст*, № 3, 58–60.
- Гранин, Д.А. (1974). Эта странная жизнь. Кишинев: Литература артистикэ, 1974. 104 с.
- Дай Рувей і Чжан Леймін (2010). Інновації та розвиток мислення (когнітивної) науки в Китаї. *Журнал автоматизації*, 36.2 193–198.
- Деан, С. 2021. Як ми вчимося. Чому мозок навчається краще, ніж машина... Поки що. Пер з англ. Ю. Костюк. Київ: Лабораторія. 288 с.
- Дубницький, М.М. (2017). Створення власного картографічного веб-ресурсу з використанням відкритого програмного забезпечення. *Український географічний журнал*, 2, 54–58.
- Історичний атлас України. Найдавніше минуле. Русь (Київська держава, Галицько-Волинська держава) (2010). Керівник проєкту й автор-упорядник Юрій Лоза. К.: Мапа, 300 с.
- Кочіш, К., Немеркені, Ж., Коваль, К. (2016). Передумови, наукова база та основні редакційні принципи підготовки нового видання “Національного атлас Угорщини”. *Український географічний журнал*, 1, 61–63.
- Лоза, Ю. (2013). “Історичний атлас України”: концепція і здобутки. *Вісник Львівського університету. Серія філологічна*, 59, 94–99.
- Любищев, А.А. (1976). Такая добровольная каторга. *Химия и жизнь*, (12), 9–14.

- Лященко, А., Черін, А. (2009). Засоби Web-картографування за технологією MS Silverlight. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 1 (17), 256–264.
- Онопрієнко, М.В. (2011). Феномен когнітивної науки і технології. *Вісник Національного авіаційного університету. Філософія. Культурологія*, 1, 68–72. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vnau_f_2011_1_18
- Полякова, Н.О. (2010). Семіотико-тематична модель структури національного атласу України. *Вісник геодезії та картографії*, 6, (69), 19–22.
- Пашенко, В.М. (2012). Історичний атлас України картограф Юрія Лози. *Науковий вісник Чернівецького університету. Географія*, 616, 97–100.
- Пашенко, В.М. (2012). Україна має свій історичний атлас (рецензія). *Вісник геодезії та картографії*, 2, 39–42.
- Пашенко, В.М. (2011). Фундаментальне картографічне видання. *Український географічний журнал*, 4, 64–65.
- Про діяльність Національної академії наук України у 2001 році та основні напрями її подальшої роботи: доповідь члена-кореспондента НАН України, директора Інституту географії НАН України Л.Руденка (2002). *Вісник Національної академії наук України*, 6, 63–65. Режим доступу: URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000009128>.
- Руденко, Л.Г., Козаченко, Т.І., Лященко, Д.О., Путренко, В.В., Чабанюк, В.С. (2011). Геоінформаційне картографування в Україні. Концептуальні основи і напрями розвитку. Монографія. Київ: Наукова думка. 104 с.
- Руденко, Л.Г., Поливач, К.А. (2011). Перспективні напрями атласного тематичного картографування України. *Вісник геодезії та картографії*, 4, 10–15.
- Сосса, Р.І. (2009). Внесок ДНВП Картографія у розвиток тематичного картографування в Україні. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*, 9, 221–229.
- Сосса, Р.І. (2011). Розвиток тематичного картографування. *Вісник геодезії та картографії*, 5, 27–32.
- Уилсон, М. (1975). Американские ученые и изобретатели. Пер. с англ.. Виктор Рамзес. 136 с.
- Чабанюк, В. (2018). Реляційна картографія: Теорія та практика. Київ: Інститут географії НАН України, 525 с.
- Чабанюк, В.С., Дишлик, О.П. (2014). Концептуальний каркас електронної версії Національного атласу України. *Український географічний журнал*, 2, 58–68.
- Чен Вей (2024). Куди прямує втілене пізнання?—Також про початок, бачення та проблеми другого покоління когнітивної науки. *Журнал соціальних наук*, 45 (1), 73.
- Шило, І.Н., Миклуш, В.П., Агейчик, В.А., Колоско, Д.Н. (2008). Основи інженерного творчства: учеб. пособие. Минск: БГАТУ, 2008. 248 с.
- Шпак, А., Руденко, Л., Бочковська, А. (2008). Перший Національний атлас України. *Вісник Національної академії наук України*, 3, 3–12.
- Ян Нін, Чжуан Бі. 2015. Просвітництво когнітивної науки про освіту дітей молодшого віку. *Журнал фізичного виховання*. 22 (6).
- Antolović, I. et al. (2013). Digital climate atlas of the Carpathian region. *Advances in Science and Research*, 10, 1, 107–111. Mode of Access: <https://asr.copernicus.org/articles/10/107/2013/asr-10-107-2013.pdf>
- Atlas Climático de Canarias (2024) [Electronic resource]. Mode of Access: <https://atlasclimatico.sitcan.es>.
- Luque, A., Suarez, P., Hernández, F. (2024). The digital climate atlas of the Canary Islands: A tool to improve knowledge of climate and temperature and precipitation trends in the Atlantic islands. *Climate Services*, 34, 100487.
- Bochníček, O., Hrušková, K., Zvara, I. (2015). Klimatický atlas Slovenska. Slovenský Hydrometeorologický ústav. Bratislava: SHMÚ. 132 s.
- Brooks, R. (2000). National Atlas of Canada Producing First Map Using Automated Generalisation of Framework Data. *networks*, 27, 104–112.
- Buckley, A., Watkins, D. (2009). Automated Map Production Workflows [Electronic resource]. (2009) // 24th International Cartographic Conference, 11. Mode of Access: https://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2009/html/nonref/1_13.pdf
- Friedenberg, J., Silverman, G. (2006). Cognitive Science: An Introduction to the Study of Mind. Thousand Oaks, London, New Delhi: Sage Publications, 532 p.
- Galvonaitė, A., Valiukas, D., Kilpys, J., Kitrienė, Z., Isiūnienė, M. (2013). Climate Atlas of Lithuania. Vilnius, Lithuanian Hydrometeorological Service under the Ministry of Environment. 176 p. ISBN 978-9955-9758-5-4.
- Georgiadis, K., Nizamis, A., Vafeiadis, T, Ioannidis, D., Tzovaras, D. (2022). Production Scheduling Optimization enabled by Digital Cognitive Platform. *Procedia Computer Science*, 204, 424–431. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.08.052>.
- Kocsis, K. (Editor-in-Chief). (2024). National Atlas of Hungary — State and Nation. Budapest, HUN-REN Research Centre for Astronomy and Earth Sciences, Geographical Institute. 207 p.
- Krikščiūnienė, V., Svilienė, R., Mačiulevičiūtė-Turiene, N. et al. (2019). The structure of Volume III of the National Atlas of Lithuania and techniques of cartographic visualization. *Polish Cartographical Review*, 51, 1, 19–27. DOI: 10.2478/pcr-2019-0003.
- Krylov, S.A., Zagrebina, G.I., Dvornikov, A.V., Loginov, D.S., Fokin, I.E. (2019). The automation of processes of atlas mapping // Abstracts of the International Cartographic Association: abstracts of the 29th International Cartographic Conference (Tokyo, 15–20 July 2019). Electronic resource: <https://ica-abs.copernicus.org/articles/1/193/2019>. DOI: 10.5194/ica-abs-1-193-2019.
- Květoň, V., Žák, M. (2007). New climate atlas of Czechia. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 51, 2, 345–349.
- IPCC WGI Interactive Atlas [Electronic resource] (2024). Mode of Access: <https://interactive-atlas.ipcc.ch>.
- Loginov, D.S. (2023). Methodological foundations for preparing a cartographic web service's graphical user interface using geological exploration data. *Geodesy and Cartography*, 8, 13–28. Mode of Access: https://geocartography.ru/en/scientific_article/2023_8_13-28. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-998-8-13-28.
- Mathews, J. (2008). Entrepreneurial Process: A Personalistic-Cognitive Platform Model. *Vikalpa*, 33 (3), 17–34. <https://doi.org/10.1177/0256090920080302>
- McCarthy, S., O'Raghallaigh, P., Kelleher, C., Adam F. (2025). A socio-cognitive perspective of knowledge integration in digital innovation networks. *Journal of Strategic Information Systems*, 34, 1, 101871. DOI 10.1016/j.jsis.2024.101871
- McPherson, M. (2017). Auto-Generating Maps Using Open-Source GIS and Python. The University of Arizona. Mode of Access: <http://hdl.handle.net/10150/626250>.
- Mikulová, K., Stastný P., Kajaba P., Turňa M. (2016). Climate atlas of Slovakia // 16th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applied Climatology (ECAC). Trieste, Italy. DOI: 10.13140/RG.2.2.27468.72325.
- National atlases on the World Wide Web [Electronic resource] (2024). Mode of Access: https://nemzetiatlasz.hu/en/national_atlases_www.html.

- Pasławski, J., Korycka-Skorupa, J., Nowacki, T., Opach, T. (2016). Choropleth maps and diagram maps in atlas of cartographic presentation methods. *Miscellanea Geographica*, 16 (1), 49–56.
- Schmidt, M., & Weiser, P. (2012). Web mapping services: development and trends. *Online maps with APIs and WebServices*, 13–21.
- Söllheim, Á.L.L., Suarez, P.M., Hernández, F.G. (2024). The digital climate atlas of the Canary Islands: A tool to improve knowledge of climate and temperature and precipitation trends in the Atlantic islands. *Climate Services*, 34, 100487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2024.100487>.
- Thagard, P. *Mind: Introduction to cognitive science*. Second edition. Cambridge: MIT press, 2005.
- Toms, S., O'Beirne, D. (2017). *ArcPy and ArcGIS*. Second Edition. Birmingham — Mumbai: Packt Publishing Ltd. 240 p. ISBN 978-1-78728-251-3.
- Toms, S., Parker, B., Tucker, C., Rubalcava, R. (2022). *Python for ArcGIS Pro: Automate cartography and data analysis using ArcPy, ArcGIS API for Python, Notebooks, and pandas*. Birmingham: Packt Publishing Ltd. 586 p. ISBN 978-1-80324-166-1.
- Valiukas, D., Galvonaitė, A., Česnulevičius, A. (2015). Methodology of Lithuanian climate atlas mapping. *Geodesy and Cartography*, 64, 1, 101–112.
- Veenendaal, B., Brovelli, M. A., & Li, S. (2017). Review of web mapping: Eras, trends and directions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(10), 317.
- Volkswagen Phaeton Production [Electronic resource] (2015). Cars Garage. Mode of Access: <https://www.youtube.com/watch?v=o110HzK2J-A&t=376s>.
- Yankelevich S. S. (2023). Multipurpose cartographic resource as an interactive system. *Geodesy and Cartography*, 9, 29–33. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-999-9-29-33.

REFERENCES

- Antolović, I. et al. (2013). Digital climate atlas of the Carpathian region. *Advances in Science and Research*, 10, 1, 107–111. Mode of Access: <https://asr.copernicus.org/articles/10/107/2013/asr-10-107-2013.pdf>
- Atlas Climático de Canarias (2024) [Electronic resource]. Mode of Access: <https://atlasclimatico.sitcan.es>.
- Balabukh, V.O., Dmytrenko, V.P., Krakovska, S.V. (2016). Quantitative assessment and forecasting of the climate system state based on observations and data from regional climate models: Report on scientific and technical work. Under the direction of V.I. Osadchyi. Kyiv: UHMI, 202 p.
- Boden, M.A. *Mind as a machine*. New York: Oxford university press, 2006.
- Bochníček, O., Hrušková, K., Zvara, I. (2015). Klimatický atlas Slovenska. Slovenský Hydrometeorologický ústav. Bratislava: SHMÚ. 132 s.
- Bochníček, O., Hrušková, K., Zvara, I. (2015). Climate atlas of Slovakia. Slovak Hydrometeorological Institute. Bratislava: SHMÚ. 132 p.
- Bogdanets, V. A., Kovalchuk, I. P. (2014). Electronic atlases: past and present. *Journal of Cartography*, 11, 194–215.
- Bondarenko, E. L. (2011). Geoinformation mapping as a modern technology of automated creation of cartographic works. *Journal of Cartography*, 3, 168–176.
- Brooks, R. (2000). National Atlas of Canada Producing First Map Using Automated Generalisation of Framework Data. *networks*, 27, 104–112.
- Buckley, A., Watkins, D. (2009). Automated Map Production Workflows [Electronic resource]. (2009) // 24th International Cartographic Conference, 11. Mode of Access: https://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2009/html/nonref/1_13.pdf
- Chabaniuk, V. (2018). *Relational cartography: Theory and practice*. Kyiv: Institute Of Geography of the NAS of Ukraine, 525.
- Chabanyuk, V., Dyshlik, O. (2014). Conceptual framework of the National atlas of Ukraine electronic version. *Ukrainian geographical journal*, 2, 58–68.
- Chen Wei (2024). Where is embodied cognition headed? On the beginnings, vision and problems of the second generation of cognitive science. *Journal of Social Science*, 45 (1), 73.
- Dai Ruwei and Zhang Leiming (2010). Innovation and development of thinking (cognitive) science in China. *Journal of Automation* 36.2, 193–198.
- Dehaene, S. (2020). *How We Learn: Why Brains Learn Better Than Any Machine... for Now*. New York: Viking. 352 p.
- Dubnytsky, M. (2017). Creating your own cartographic web resource using open source software. *Ukrainian Geographical Journal*, 2, 54–58.
- Friedenberg, J., Silverman, G. *Cognitive Science: An Introduction to the Study of Mind*. Thousand Oaks, London, New Delhi: Sage Publications, 2006. 532 p.
- Galvonaitė, A., Valiukas, D., Kilpys, J., Kitrienė, Z., Isiūnienė, M. (2013). *Climate Atlas of Lithuania*. Vilnius, Lithuanian Hydrometeorological Service under the Ministry of Environment. 176 p. ISBN 978-9955-9758-5-4.
- Georgiadis, K., Nizamis, A., Vafeiadis, T, Ioannidis, D., Tzovaras, D. (2022). Production Scheduling Optimization enabled by Digital Cognitive Platform. *Procedia Computer Science*, 204, 424–431. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.08.052>.
- Granin, D.A. (1974). *This strange life*. Kishinev: Literatura artistike, 1974. 104 c.
- Historical Atlas of Ukraine. The most ancient past. Rus (Kyivan state, Galicia-Volyn state) (2010). Project manager and author-compiler Yuriy Loza. K.: Mapa, 300 p.
- Kocsis, K. (Editor-in-Chief). (2024). *National Atlas of Hungary — State and Nation*. Budapest, HUN-REN Research Centre for Astronomy and Earth Sciences, Geographical Institute. 207 p.
- Kocsis, K., Nemerkeny, J., Koval, K. (2016). Prerequisites, scientific basis and basic editorial principles of preparation of the new edition of the National Atlas of Hungary. *Ukrainian Geographical Journal*, 1, 61–63.
- Krikščiūninė, V., Svilienė, R., Mačiulevičiūtė-Turiene, N. and oth. (2019). The structure of Volume III of the National Atlas of Lithuania and techniques of cartographic visualization. *Polish Cartographical Review*, 51, 1, 19–27. DOI: 10.2478/pcr-2019-0003.
- Krylov, S.A., Zagrebin, G.I., Dvornikov, A.V., Loginov, D.S., Fokin, I.E. (2019). The automation of processes of atlas mapping // Abstracts of the International Cartographic Association: abstracts of the 29th International Cartographic Conference (Tokyo, 15–20 July 2019). Electronic resource: <https://ica-abs.copernicus.org/articles/1/193/2019>. DOI: 10.5194/ica-abs-1-193-2019.
- Květoň, V., Žák, M. (2007). New climate atlas of Czechia. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 51, 2, 345–349.
- Loza, Y. (2013). "Historical Atlas of Ukraine": concept and achievements. *Visnyk of Lviv University. Philological series*, 59, 94–99.
- IPCC WGI Interactive Atlas [Electronic resource] (2024). Mode of Access: <https://interactive-atlas.ipcc.ch>.

- Loginov, D.S. (2023). Methodological foundations for preparing a cartographic web service's graphical user interface using geological exploration data. *Geodesy and Cartography*, 8, 13–28. Mode of Access: https://geocartography.ru/en/scientific_article/2023_8_13-28. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-998-8-13-28.
- Luque, A., Suarez, P., Hernández, F. (2024). The digital climate atlas of the Canary Islands: A tool to improve knowledge of climate and temperature and precipitation trends in the Atlantic islands. *Climate Services*, 34, 100487.
- Lyashchenko, A., Cherin, A. (2009). Web-mapping tools based on MS Silverlight technology. *Modern achievements of geodetic science and production*, 1 (17), 256–264.
- Lyubishchev, A.A. (1976). Such voluntary penal servitude. *Chemistry and Life*, (12), 9–14.
- Mathews, J. (2008). Entrepreneurial Process: A Personalistic-Cognitive Platform Model. *Vikalpa*, 33 (3), 17–34. <https://doi.org/10.1177/0256090920080302>
- McCarthy, S., O'Raghallaigh, P., Kelleher, C., Adam F. (2025). A socio-cognitive perspective of knowledge integration in digital innovation networks. *Journal of Strategic Information Systems*, 34, 1, 101871. DOI 10.1016/j.jsis.2024.101871
- McPherson, M. (2017). Auto-Generating Maps Using Open-Source GIS and Python. The University of Arizona. Mode of Access: <http://hdl.handle.net/10150/626250>.
- Mikulová, K., Stastný, P., Kajaba, P., Turňa, M. (2016). Climate atlas of Slovakia // 16th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applied Climatology (ECAC). Trieste, Italy. DOI: 10.13140/RG.2.2.27468.72325.
- National atlases on the World Wide Web [Electronic resource] (2024). Mode of Access: https://nemzetiatlas.hu/en/national_atlases_www.html.
- Onoprienko, M.V. (2011). The phenomenon of cognitive science and technology. *Bulletin of the National Aviation University. Philosophy. Culturology*, 1, 68–72. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vnau_f_2011_1_18.
- Pasławski, J., Korycka-Skorupa, J., Nowacki, T., Opach, T. (2016). Choropleth maps and diagram maps in atlas of cartographic presentation methods. *Miscellanea Geographica*, 16 (1), 49–56.
- Pashchenko, V.M. (2012). Historical atlas of Ukraine by cartographer Yuriy Loza. *Scientific Visnyk of Chernivtsi University. Geography*, 616, 97–100.
- Pashchenko, V.M. (2012). Ukraine has its own historical atlas (review). *Bulletin of Geodesy and Cartography*, 2, 39–42.
- Pashchenko, V.M. (2011). Fundamental cartographic edition. *Ukrainian Geographical Journal*, 4, 64–65.
- Polyakova, N.O. (2010). Semiotic and Thematic Model of the Structure of the National Atlas of Ukraine. *Visnyk of Geodesy and Cartography*, 6 (69), 19–22.
- On the activities of the National Academy of Sciences of Ukraine in 2001 and the main directions of its further work: report by Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Director of the Institute of Geography of the NAS of Ukraine
- L. Rudenko. (2002). *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 6, 63–65. Mode of Access: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000009128>.
- Rudenko, L.G., Kozachenko, T.I., Lyashenko, D.O., Putrenko, V.V., Chabanyuk, V.S. (2011) Geographic information mapping in Ukraine. Conceptual bases and directions of development. Monograph. Kyiv: Naukova Dumka. 104 c.
- Rudenko, L.G., Polivach K.A. (2011). Perspective directions of atlas thematic mapping of Ukraine. *Visnyk of Geodesy and Cartography*, 4, 10–15.
- Schmidt, M., & Weiser, P. (2012). Web mapping services: development and trends. Online maps with APIs and WebServices, 13–21.
- Söllheim, Á.L.L., Suarez P.M., Hernández F.G. (2024). The digital climate atlas of the Canary Islands: A tool to improve knowledge of climate and temperature and precipitation trends in the Atlantic islands. *Climate Services*, 34, 100487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2024.100487>.
- Sossa, R.I. (2009). Contribution of the SSPE Cartography to the development of thematic mapping in Ukraine. *Problems of continuous geographical education and cartography*, 9, 221–229.
- Sossa, R.I. (2011). Development of thematic mapping. *Visnyk of Geodesy and Cartography*, 5, 27–32.
- Shpak, A., Rudenko, L., Bochkovska, A. (2008). The first National atlas of Ukraine. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 3, 3–12.
- Thagard, P. Mind: Introduction to cognitive science. Second edition. Cambridge: MIT press, 2005.
- Toms, S., O'Beirne, D. (2017). ArcPy and ArcGIS. Second Edition. Birmingham — Mumbai: Packt Publishing Ltd. 240 p. ISBN 978-1-78728-251-3.
- Toms, S., Parker, B., Tucker, C., Rubalcava, R. (2022). Python for ArcGIS Pro: Automate cartography and data analysis using ArcPy, ArcGIS API for Python, Notebooks, and pandas. Birmingham: Packt Publishing Ltd. 586 p. ISBN 978-1-80324-166-1.
- Valiukas, D., Galvonaitė, A., Česnulevičius, A. (2015). Methodology of Lithuanian climate atlas mapping. *Geodesy and Cartography*, 64, 1, 101–112.
- Veenendaal, B., Brovelli, M.A., & Li, S. (2017). Review of web mapping: Eras, trends and directions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6 (10), 317.
- Volkswagen, Phaeton Production [Electronic resource] (2015). Cars Garage. Mode of Access: <https://www.youtube.com/watch?v=o110HzK2J-A&t=376s>.
- Volodchenko, A. (2015). National Atlas of Lithuania, volume 1 (2014). *Geokontext*, 3, 58–60.
- Yang Ning, Zhuang Bi. 2015. Enlightenment of cognitive science on early childhood education. *Journal of Physical Education*. 22 (6).
- Yankelevich, S. S. (2023). Multipurpose cartographic resource as an interactive system. *Geodesy and Cartography*, 9, 29–33. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-999-9-29-33.

Andrii Oreshchenko

ORCID:0000-0002-8363-6885

andrey_o@ukr.net

Ukrainian Hydrometeorological Institute
of State Emergency Service of Ukraine
and National Academy of Sciences of Ukraine

OPTIMIZATION METHODS FOR THE CREATION OF WEB-BASED ATLAS "CLIMATE AND WATER RESOURCES OF UKRAINE"

The purpose of this study is to summarize methods for optimizing the process of creating a web-based atlas "Climate

and Water Resources of Ukraine". The methods of optimizing the creation of the atlas web shell, the maps themselves, the drafting of the atlas and its implementation are considered. The literature review considers the peculiarities of creating fundamental cartographic works, the time spent on it, and shows the importance of using methods to optimize the production of cartographic products. The experience of atlas mapping of specialists involved in the creation of the atlas is also considered. The essence of serial mapping using an automatic mapping system, large-node assembly (web-based atlas shell), pyramidal project development algorithm, reduction of the number of production processes, method of map unification, grouping of the same or similar tasks, use of a "shortened technical project file", automation of production processes, step-by-step progress with a predefined result are described in detail. As a re-

sult of using these methods, the time spent on the development of the atlas was reduced from 7 thousand working hours to 1.5 thousand. The development of the atlas was completed in 2023 and published here: <https://maps.uhmi.org.ua>. It is concluded that these optimization methods constitute a supercompetence responsible for the quality and productivity of labor. The atlas contains more than 5,000 maps, most of which were made using the developed methodology. These maps show the average, maximum, and minimum air temperature for the month, precipitation, climate temperature norm, climate change forecast, cold waves, heat waves and sudden changes in air temperature, and many other indicators.

Keywords: atlas, web, methodology, mapping, climate, water resources, automation, optimization.



ПАМ'ЯТНІ ТА ЮВІЛЕЙНІ ДАТИ

СУСІДКУ МИХАЙЛУ МИКИТОВИЧУ — 100 (3.10.2024–10.05.2017)



Гідрометеорологічна служба України з початку створення була багата на яскраві особистості, які творили історію її становлення та розвитку. До цієї славної плеяди українських гідрометеорологів належить кандидат географічних наук, старший науковий співробітник **Сусідко Михайло Микитович**, який понад 60 років самовіддано працював в гідрометеорологічній службі України.

Михайло Микитович Сусідко народився 3 жовтня 1924 року на Миколаївщині у с. Бурячки. Як багато інших його однолітків, брав участь у Другій світовій війні та був поранений. Нагороджений орденом "Вітчизняної війни I ступеня", медаллю "За відвагу", орденом "За мужність III ступеня".

Після закінчення війни М.М. Сусідко назавжди пов'язав своє життя з гідрометеорологічною службою України. По закінченню Харківського гідрометеорологічного технікуму працював старшим техніком-гідрологом гідрометеорологічної станції Алмазна Луганської області (1950–1951 рр.); інженером-гідрологом та начальником гідрометеорологічної станції Луцьк (1951–1954 рр.); начальником Во-

линського обласного гідрометеорологічного бюро (1955–1966 рр.). У 1957 році Михайло Микитович здобув вищу освіту за спеціальністю "гідрологія суходолу".

М.М. Сусідко приділяв велику увагу питанням організації роботи, технічному розвитку мереж спостережень, зміцненню кадрового потенціалу підлеглої гідрометеорологічної організації. Висока професійна підготовка у поєднанні з організаторськими здібностями М.М. Сусідка отримали визнання, протягом 1966–1970 років він обіймав посаду заступника начальника Українського республіканського управління гідрометеорологічної служби.

У 1970 році розпочався новий етап у житті М.М. Сусідка — він пов'язав свою долю з гідрометеорологічною наукою, перейшовши на роботу до Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту (на сьогодні — Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України). У його особі українська наукова гідрологія здобула талановитого вченого, який поєднував у собі міцну теоретичну підготовку, бажання та вмін-

ня оволодівати новими напрямками досліджень, знаходити шляхи для практичного застосування результатів власних розробок.

На той час важливим, але і надзвичайно складним напрямком гідрологічного прогнозування було підвищення точності та завчасності методів прогнозу таких небезпечних гідрологічних явищ, як річкові паводки в Українських Карпатах. Михайло Микитович розпочав наполегливо працювати у цьому напрямку досліджень, розробляючи сучасні методи прогнозування, які спирались на розрахунок гідрометеорологічних процесів, що відбуваються у річковому басейні та в русловій мережі.

Результати досліджень були покладені в основу кандидатської дисертації на тему "Прогноз перебігу дощового стоку в басейні Дністра на основі урахування процесів, що відбуваються в русловій мережі", яку М.М. Сусідко успішно захистив у 1976 році, здобувши науковий ступінь "кандидата географічних наук".

Працюючи до 2011 року в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України на посадах старшого наукового співробітника, завідувача лабораторії гідрологічних прогнозів, провідного наукового співробітника М.М. Сусідко зробив вагомий внесок у розвиток і впровадження у практичну діяльність гідрометеорологічних організацій методичної бази гідрологічного прогнозування талого і дощового стоку, в основу якої покладено застосування результатів наукових досліджень і математичного моделювання процесів формування річкового стоку, з урахуванням метеорологічних факторів та ландшафтних умов водозбору. Значну увагу М.М. Сусідко приділяв автоматизації процесу складання прогнозів, застосуванню електронно-обчислювальних машин. Зокрема, він один з найперших став розробляти для методів прогнозування програмне забезпечення, яке дозволяло виконувати розрахунки на персональних комп'ютерах. Методична спадщина М.М. Сусідка і зараз використовується в гідрометеорологічних організаціях при складанні оперативних гідрологічних прогнозів.

З проголошенням незалежності України М.М. Сусідко активно працював у напрямку створення національної бази нормативних документів та розвитку української наукової термінології з гідрології. Так, він був відповідальним виконавцем робіт із створення першого національного стандарту "Гідрологія суші. Терміни та визначення основних понять", виданого у 1997 році. До цього, для потреб науковців і практиків, ним було підготовлено у 1994 році "Російсько-український словник гідрологічних термінів", чи не найперший фаховий термінологічний гідрологічний словник на теренах незалежної України.

Вагомий внесок М.М. Сусідко зробив у міжнародне співробітництво гідрометеорологічної служби України як за часів колишнього СРСР, так і після 1991 року. Він був одним з найбільш активних членів Національного комітету України із здійснення Міжнародної гідрологічної програми (МГП) ЮНЕСКО та Оперативної гідрологічної програми Всесвітньої метеорологічної організації. За його участю було виконано низку важливих досліджень у рамках регіонального співробітництва Дунайських країн з виконання проєктів МГП ЮНЕСКО. Цьому сприяли не лише високий науковий рівень його досліджень, а й добре володіння німецькою мовою, яка тривалий час була однією з робочих мов регіонального співробітництва Дунайських країн.

М.М. Сусідком було підготовлено шістьох кандидатів наук, які успішно захистили дисертації. З під "його пера" вийшло більш ніж 150 наукових праць, які неодноразово цитувались зарубіжними дослідниками у своїх публікаціях і не втратили до цього часу свого наукового та практичного значення.

За довголітню сумлінну працю був нагороджений медаллю "Ветеран праці", знаком "Почесний працівник гідрометслужби України".

Пішов з життя Михайло Микитович Сусідко 10 травня 2017 року, залишивши після себе світлу пам'ять серед гідрометеорологічної спільноти України.

*З повагою,
учні, колеги та колежанки*

ДО 80-РІЧЧЯ ВИДАТНОГО ВЧЕНОГО ГІДРОЛОГА УКРАЇНСЬКОГО ПОХОДЖЕННЯ, ЛАУРЕАТА НОБЕЛІВСЬКОЇ ПРЕМІЇ МИРУ 2007 Р. ЄВГЕНА-ЗЕНОНА СТАХІВА (21.12.1944)



Вже стало тривіальною істиною, що земля України багата на таланти і не лише в галузі культури. Проте, взнаки довголітньої відсутності державності та привласнення українських геніїв, спочатку російською а потім радянською імперією (СРСР) і зарахування їх до так званої “великої російської нації”, у статистичних зведеннях нобелівських лауреатів не знайдеш ні громадян України, ні представників інших народів “великої” імперії. Крім того, багато українців змушені були перебраться за кордон та стати громадянами інших держав внаслідок відсутності гідних умов життя, голодоморів, відвертого геноциду, переслідувань національної творчої інтелігенції та борців за незалежність України з боку тоталітарного радянського режиму. За цих обставин за межами України опинився і Євген Павлович Стахів — батько майбутнього лауреата Нобелівської премії миру в складі команди вчених, експертів, що досягли визначних здобутків у вивченні змін клімату та їх впливу на водні ресурси.

Батько, Євген Стахів родом із Перемишля, був відомим підпільником, провідником ОУН. Його май-

бутня дружина Марія була з родини Винників. Старшу сестру Марії Наталку розстріляли фашисти у Бабиному Яру у 1942 році. Старший брат Євгена Володимир був видатним українським патріотом, активним учасником ОУН, міністром закордонних справ Української республіки в уряді Ярослава Стецька.

Євген та Марія одружились 8 січня 1944 року у Львові. Тікаючи від переслідувань радянських каральних органів змушені були переховуватись в Австрії. Саме там, у віденському шпиталі Зенірхеп 21 грудня 1944 року у подружжя народився син Зенон. У 1950 р. родина вирішила переїхати до Сполучених Штатів Америки, проте несподівано захворів на менінгіт молодший син (брат Зенона) Борис і Марія змушена була залишатись із ним у лікарні до одужання. Батько із старшим сином Зеноном, якому було на той час 6 років, поїхали за океан торувати шлях до нового життя, шукати роботу та місце проживання. Через 15 місяців сім'я нарешті об'єдналась в Америці. У 1952 році народилася донька Лариса. Незважаючи на значні життєві поневіряння та

труднощі із працевлаштуванням сім'я втрималась в еміграції та закріпилась у Нью-Йорку. Вдалось навіть забезпечити гідну освіту дітям.

З юних років Євген-Зенон молодший зацікавився гідрологією, океанологією, водними ресурсами та кліматологією. У 1960-х роках він працює асистентом у знаменитого вченого-кліматолога у Колумбійському університеті в Нью-Йорку. Проте свій докторський ступінь з управління водними ресурсами молодий вчений здобуває в університеті Джона Гопкінса в Балтиморі. Далі він занурюється у розробку методів управління водними ресурсами великих річкових басейнів, очолює управління міжнародних проєктів Інституту водних ресурсів Корпусу інженерів армії США. З 1989 року він працює у Міжнародній групі експертів ООН зі зміни клімату як провідний експерт із дослідження водних проблем. Тобто, наприкінці власне наукової кар'єри Євген-Зенон Стахів став директором з міжнародних проєктів Інституту водних ресурсів Корпусу інженерів армії США.

У 2003 році Євгена Стахіва призначають міністром водного господарства та іригації в тимчасовій військовій адміністрації Іраку.

2007 року він стає лауреатом Нобелівської премії миру серед числа вчених-експертів з питань зміни клімату. У привітанні лауреатів зазначалося: за "їхні зусилля, направлені на поліпшення більшої кількості знань про зміни клімату, що відбуваються за вини людини, та закладання основ тих заходів, що необхідні для боротьби з такими змінами".

Ми пам'ятаємо яскравий виступ професора Стахіва на міжнародній науковій конференції у Києві у 2010 році, яку проводив Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України. Його доповідь була присвячена розробці методів управління водними ресурсами великих річкових басейнів та протиповеневого захисту в умовах кліматичних змін (фото).

Під час однієї з зустрічей в Україні професор Стахів сказав: "Я більше відчуваю, що є українським лауреатом Нобелівської премії. Я пишу статті для американців та українців. Я почав шукати українських лауреатів і знайшов десять таких. Почав думати, чому Володимир Вернадський не є лауреатом? Адже він заслужив цю премію."

"Я завжди вважав, що є українським науковцем", — підкреслив професор Стахів.

Доктор Євген Стахів нині є технічним директором Міжнародного центру ЮНЕСКО з управління водними ресурсами, він був співголовою багатьох міжнародних конференцій, автор понад 120 наукових статей та 160-ти технічних звітів.

Також важливо відмітити, що Євген Стахів переймається ситуацією в Україні, впродовж останніх десятиріч допомагає становленню та розбудові нашої держави.

Будемо пишатись і надалі лауреатом Нобелівської премії українського походження Євгеном-Зеноном Стахівим.

Бажаємо Вам, пане Євгене міцного здоров'я та нових наукових здобутків.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ

Редакція журналу “Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля” приймає до розгляду оригінальні, раніше не опубліковані наукові статті з актуальних питань теоретичної та прикладної метеорології, кліматичних і гідрологічних досліджень, здійснення моніторингу вод та атмосферного повітря, а також матеріали окремих досліджень із суміжних тематик, пов’язаних з вирішенням важливих кліматичних, метеорологічних та гідрологічних проблем, питань моніторингу. Друкуються також короткі повідомлення, матеріали з’їздів і конференцій, рецензії на наукові монографії. Журнал друкує роботи в галузі “Природничі науки” за спеціальністю “Науки про Землю” (103).

Подані до редакції “Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля” рукописи проходять незалежне анонімне рецензування. Рукописи, що не відповідають профілю журналу, мають низький науково-теоретичний рівень або які не повною мірою відповідають правилам для авторів, можуть бути відхилені.

Автори несуть повну відповідальність за точність викладених фактів, цитат, статистичних даних, бібліографічних довідок, написання географічних назв, власних імен.

Для публікації в журналі приймаються рукописи українською або англійською мовами.

Публікація статей в журналі безоплатна. Статті подаються на сайт журналу <https://journal.uhmi.org.ua/> в електронній формі.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РУКОПISУ

Обсяг: оригінальних наукових статей — до 15 сторінок (разом з резюме, таблицями та ілюстративним матеріалом), методологічних, проблемних і оглядових — не більше 20 сторінок, коротких повідомлень, рецензій, матеріалів конференцій і з’їздів — 5 сторінок.

Рукопис готується у текстовому редакторі Microsoft Word, шрифт — 12, інтервал між рядками — 1.

СТРУКТУРА СТАТТІ

1. ІНФОРМАЦІЙНА ЧАСТИНА.

1.1. Містить наступні позиції: індекс УДК (вирівнювання по лівому краю), прізвище, повністю ім’я та по-батькові автора (авторів) — напівжирним шрифтом, ORCID та E-mail кожного автора (авторів), назва установи, де працює автор(и), із зазначенням

відомчої підпорядкованості (курсивом), адреси, телефона, — з вирівнюванням по правому краю. Якщо стаття має кілька авторів, то ім’я автора для листування позначається зірочкою.

1.2. Назва статті наводиться великими літерами.

1.3. У Резюме (Анотації) викладають положення відповідно до структури статті (мета, методи дослідження, результати, новизна), обсяг резюме українською мовою, якщо стаття україномовна, — від 800 до 1800 знаків, англійською — не менше 1800 знаків з пробілами, якщо стаття англійською мовою, а анотація повинна містити не менше 1800 знаків (з пробілами).

1.3. Ключові слова (не більше 5–6).

1.4. У статтях, підготовлених українською мовою, імена авторів (без по батькові), назва установи, назва статті, резюме та ключові слова додатково наводяться англійською мовою.

2. ТЕКСТОВА ЧАСТИНА РУКОПISУ.

2.1. Текст статті має містити наступні рубрики:

- Вступ (Детальна оцінка актуальних досліджень і публікацій, які містили проміжні результати або варіанти розв’язання даної проблеми/тематики. Виділення аспектів, які досі залишаються невирішеними. Мета даної публікації, яку не слід плутати з метою тематичних або дисертаційних досліджень в цілому).
- Матеріали і методи (для оригінальних статей).
- Результати та їх обговорення.
- Висновки (підсумок результатів у відповідності з метою роботи).

2.2. Таблиці, картографічний та ілюстративний матеріал нумеруються, на них робляться посилання в тексті. Кількість ілюстрацій залежно від обсягу статті не має перевищувати 10. Таблиці із заголовком і порядковим номером, розміщують одразу після посилання на них (після закінчення абзацу). Слід запобігати громіздких таблиць та таблиць, заповнених лише первинними даними.

Географічні карти і картосхеми не мають бути перенасиченими написами, перетинання назв і цифр неприпустиме. Підписи на картах повинні добре читатись; слід зазначати масштаб та наводити умовні позначення.

Вся графіка має бути комп’ютерною, виконаною в одному з форматів: TIFF, BMP, JPEG з роздільністю не менш 350 dpi.

Рисунки, графіки, схеми та ін. додатково подаються окремими файлами.

3. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЛІТЕРАТУРНИХ ПОСИЛАНЬ.

3.1. Бібліографічні описи у списку бібліографічних посилань наводять за бібліографічним стилем цитування APA style references. <https://apastyle.apa.org>

3.2. Джерела у списку використаних джерел не нумерують і подають за абеткою з абзацом (відступом від лівого краю) 0,5 см.

3.3. До списку не включаються видання, опубліковані в російській федерації та білорусі після 2014 року.

3.4. Для статей УКРАЇНСЬКОЮ мовою наводять ДВА списки використаних джерел: список використаних джерел мовою оригіналу (бібліографічні описи подають за бібліографічним стилем цитування APA style reference) та References — у перекладі англійською.

3.5. Для статей АНГЛІЙСЬКОЮ мовою подають ОДИН список використаних джерел — References, у якому бібліографічний опис джерел не романським шрифтом, а, наприклад, кириличним, арабським, китайським тощо, наводять у перекладі англійською мовою, зазначають наприкінці бібліографічного опису у квадратних дужках англійською мовою мову джерела — [in Ukrainian], тощо.

3.6. Формат посилання на джерела в тексті Внутрішньотекстові посилання подають у круглих дужках із зазначенням:

- прізвища автора (якщо автор один) або перших слів назви праці (для видань без авторів), через кому року публікації і, за необхідності, через кому сторінок після скорочення "с."

(укр. мовою) або "р." (англ. мовою). Назву праці можна скорочувати, а пропущені слова позначати знаком "три крапки": (Surname, 2023), (Surname, 2023, p. 123), (Surname, 2023, pp. 12–34), (Title of the book ..., 2023, p. 123), (Title of the ..., 2023);

- прізвища співавтора (якщо авторів не більше двох), року видання: (Surname 1 & Surname 2, 2023; Прізвище 1 та Прізвище 2, 2023);
- прізвища лише першого співавтора (якщо авторів понад двоє), скорочення "та ін." або "et al.", року видання: (Surname 1 et al., 2023; Прізвище 1 та ін., 2023);
- прізвища та ініціалів автора, року видання (якщо у статті є посилання на роботи авторів з однаковим прізвищем, опубліковані того самого року): (Surname, N., 2023);
- прізвища автора, року видання першої роботи, року видання наступної роботи (якщо стаття містить посилання на роботи одного автора, опубліковані в різні роки прізвище автора не дублюють): (Surname, 2022, 2023);
- прізвища автора, року видання, малої латинської літери після року видання (якщо стаття містить посилання на роботи одного автора, опубліковані того самого року): (Surname, 2023a, 2023b, 2023c).

Для кожного джерела потрібно зазначити DOI (за наявності).

Детальні вимоги та приклади оформлення бібліографічних описів можна також подивитися у: Publication Manual of the American Psychological Association (APA), 7th Edition та у Прикладах оформлення посилань за APA (7th ed.) у списку використаних джерел. <https://apastyle.apa.org/products/publication-manual-7th-edition>.