

МОДЕЛЮВАННЯ КОМПОНЕНТІВ ВОДНОГО БАЛАНСУ БАСЕЙНУ ДНІСТРА ЗАСОБАМИ ГІС

Давибіда Л.І.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ
lidia.davybida@nung.edu.ua

У статті розглянуто проблему формування та просторово-часової мінливості компонентів водного балансу басейну річки Дністер, що є другою за величиною річкою України та відіграє ключову роль у забезпеченні водними ресурсами значної частини території держави. Під впливом кліматичних змін, антропогенного навантаження та воєнних дій у регіоні спостерігаються суттєві трансформації гідрологічного режиму, зокрема виснаження водних ресурсів, збільшення частоти посух, зниження рівня ґрунтових і підземних вод, погіршення якості води.

Метою дослідження є розроблення комплексного геоінформаційного підходу до моделювання компонентів водного балансу басейну Дністра із застосуванням супутникових даних і хмарної платформи Google Earth Engine (GEE). Для реалізації цього підходу використано дані про опади з набору CHIRPS та показники евапотранспірації з продукту MOD16A2 (MODIS), а також адаптовано алгоритм інтегрованого розрахунку водного балансу та здійснено обчислення індексів EVI (Enhanced Vegetation Index) та MSI (Moisture Stress Index), що дозволяють відобразити рівень екологічного стресу території.

Отримані результати демонструють виражену просторову мінливість компонентів водного балансу: у верхній частині басейну, де переважають гірські ландшафти, спостерігаються вищі обсяги опадів і позитивний баланс, натомість у нижній частині басейну, поблизу Чорного моря, характерним є дефіцит водних ресурсів через перевищення показників евапотранспірації над кількістю опадів. Часовий аналіз за 2014-2024 рр. засвідчив сезонну динаміку чергування періодів надлишку та дефіциту вологи, що зумовлює нестабільність водного режиму. Розроблений алгоритм може бути використаний органами водного менеджменту, екологічними службами та науковими установами для оперативного аналізу стану водних ресурсів і підтримки прийняття управлінських рішень. Отримані результати забезпечують новий рівень деталізації оцінки водних ресурсів басейну Дністра та можуть бути використані для оптимізації управління водними ресурсами та планування адаптаційних заходів у контексті зміни клімату. *Ключові слова:* опади, евапотранспірація, Google Earth Engine, супутникові дані, геоінформаційні технології, мультиспектральні індекси.

Modeling the water balance components of the Dniester River basin using GIS tools. Davybida L.

The article discusses the problem of formation and spatial-temporal variability of water balance components in the Dniester River basin, the second largest river in Ukraine. It is key in providing water resources to a significant part of the country. Under the influence of climate change, anthropogenic pressure, and military actions in the region, significant transformations of the hydrological regime are observed, particularly depletion of water resources, increased frequency of droughts, reduction of soil and groundwater levels, and deterioration of water quality.

The study aims to develop a comprehensive geoinformation approach to modelling the components of the water balance of the Dniester basin using satellite data and the Google Earth Engine (GEE) cloud platform. To implement this approach, precipitation data from the CHIRPS dataset and evapotranspiration indicators from the MOD16A2 (MODIS) product, as well as an adapted algorithm for integrated water balance calculation and the calculation of EVI (Enhanced Vegetation Index) and MSI (Moisture Stress Index) indices, which allow the level of ecological stress in the territory to be reflected.

The results obtained demonstrate significant spatial variability in water balance components: in the upper part of the basin, where mountainous landscapes prevail, higher precipitation volumes and a positive balance are observed, while in the lower part of the basin, near the Black Sea, there is a characteristic water deficit due to evapotranspiration exceeding precipitation. A time analysis for 2014-2024 showed seasonal dynamics of alternating periods of moisture surplus and deficit, which causes instability in the water regime. Water management authorities, environmental services, and scientific institutions can use the developed algorithm for operational analysis of the state of water resources and to support management decision-making. The results provide a new level of detail in assessing water resources in the Dniester basin. They can be used to optimise water resource management and plan adaptation measures in the context of climate change. *Key words:* precipitation, evapotranspiration, Google Earth Engine, satellite data, geoinformation technologies, multispectral indices.

Постановка проблеми. Річка Дністер є другою за величиною в Україні за обсягом водних ресурсів і відіграє ключову роль у забезпеченні водного балансу регіону. Площа її водозбірного басейну становить близько 72,9 тис. км², з яких 73% (53,5 тис. км²) розташовані на території України. Загальна довжина річки сягає 1352 км, з яких 912 км (67%) проходять територією України. Україна володіє верхньою течією та гирлом Дністра, тоді як приблизно 225 км річки є спільною

українсько-молдовською ділянкою, а 475 км протікають територією Республіки Молдова. Невелика частина витоків розташована в межах Польщі.

У сучасних умовах басейн Дністра зазнає суттєвих екологічних та гідрологічних змін, спричинених глобальними кліматичними зрушеннями, неефективним управлінням природними ресурсами, а останнім часом – і наслідками воєнної агресії. Це призводить до виснаження та дефіциту водних ресурсів, що нега-

тивно позначається на екосистемах, соціально-економічному розвитку регіону та стані довкілля [1, 2]. Серед основних наслідків деградації водного режиму у першу чергу слід виділити підвищення мінливості обсягів річкового стоку, погіршення якості води, скорочення біорізноманіття, збільшення частоти й інтенсивності посух і екстремальних погодних явищ, а також зниження рівня ґрунтових вод.

Актуальність дослідження. Для розроблення ефективних стратегій управління водними ресурсами необхідно глибше розуміти баланс та динаміку формування водних запасів, а також просторово-часові закономірності їх змін. З огляду на це, актуальним є застосування сучасних геоінформаційних технологій для комплексного аналізу водного балансу басейну Дністра.

У даному дослідженні використано геоінформаційні методи моделювання на основі хмарної платформи Google Earth Engine, що дає змогу оцінити основні компоненти водного балансу річкового басейну в динаміці, забезпечуючи високий рівень просторової та часової деталізації результатів [3].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дані дослідження проводились в рамках виконання науково-дослідних робіт на тему: «Дослідження розвитку та активізації небезпечних геологічних процесів в умовах природно-техногенної дестабілізації довкілля на основі геоінформаційного підходу» (державний номер реєстрації – 0121U113626) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Комплексні геоекологічні дослідження річково-басейнової системи Дністра зумовлені високим ступенем господарського освоєння та інтенсивною експлуатацією природних ресурсів [4] та часто включають застосування технологій геоінформаційно-картографічного моделювання [5]. Зокрема були комп'ютерно-картографічні моделі басейнів окремих приток та інформаційні бази даних, що відображають стан басейнових систем [6, 7]. Для аналізу тенденцій зміни стоку води та наносів, а також у прогнозних цілях активно використовуються методи множинної кореляції для гідрологічних та метеорологічних рядів [8]. В останні роки проводилися дослідження прогнозування змін стоку річок басейну Дністра за допомогою числових кліматичних моделей, які показали тенденцію до зниження загального об'єму стоку, що пов'язують із впливом глобального потепління та гідротехнічних споруд. Разом із тим, у Карпатській частині басейну фіксуються високі показники модулів стоку води на тлі зменшення водності річок рівнинної території України [9].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значну кількість досліджень, присвячених гідрологічним характеристикам басейну Дністра, низка важливих аспектів залишається недо-

статньо вивченою. Зокрема, більшість робіт зосереджуються на оцінці окремих компонентів водного балансу або аналізі короткострокових змін стоку, тоді як комплексний просторово-часовий аналіз взаємозв'язків між складовими балансу (опаді, випаровування, поверхневий і підземний стік) у межах усього басейну виконувався обмежено. Крім того, мережі гідрологічних та гідрогеологічних спостережень останніми десятиліттями істотно скоротилися, що ускладнює можливість моніторингу водних ресурсів у реальному часі та формування надійних прогнозів. Таким чином, актуальним є розроблення підходу до комплексного моделювання компонентів водного балансу басейну Дністра з використанням сучасних геоінформаційних технологій, який дозволяє забезпечити високу деталізацію просторових і часових змін, виявити основні тенденції та визначити зони потенційного дефіциту водних ресурсів.

Новизна. Уперше для території басейну річки Дністер застосовано інтегрований геоінформаційний підхід до моделювання компонентів водного балансу із використанням даних супутникового моніторингу та хмарної платформи Google Earth Engine. Розроблений підхід дозволив поєднати багаторічні дані супутникових спостережень, кліматичні показники і гідрологічну інформацію у єдиному середовищі просторового аналізу, визначити просторово-часові закономірності змін основних компонентів водного балансу в межах усього басейну та виявити ділянки з підвищеним ризиком дефіциту водних ресурсів під впливом кліматичних та антропогенних чинників.

Методологічне або загальнонаукове значення. Водний баланс у гідрологічній системі є базовим поняттям, що відображає взаємозв'язок між надходженням і витратами води для певної території. До складових надходження належать опади (P), зокрема дощ і сніг, тоді як витрати води відбуваються через стік (Q) та евапотранспірацію (ET). Додатково враховується зміна запасів води (ΔS), що охоплює варіації у вологості ґрунту, рівні підземних вод і водних об'ємах у природних сховищах [10]. У найзагальнішому вигляді водний баланс можна виразити як різницю між сумарним надходженням і сумарним вилученням води, що визначає загальну доступність водних ресурсів на певній території та слугує основою для оцінки її гідрологічного стану:

$$P-ET=Q+\Delta S.$$

Для створення просторових і часових моделей водного балансу в Google Earth Engine було використано адаптований і вдосконалений алгоритм, запропонований дослідниками з Spatial Informatics Group (США) та Asian Disaster Preparedness Centre (Таїланд) [11].

У дослідженні використовувалися такі набори даних:

1) CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) – набір даних про опади,

розроблений Climate Hazards Center. Цей продукт охоплює понад 30 років спостережень і поєднує супутникові знімки з просторовою роздільною здатністю $0,05^\circ$ (~ 5 км) із наземними даними спостережних станцій *in situ*. CHIRPS забезпечує побудову глобальних сіткових часових рядів опадів, що широко використовуються для аналізу кліматичних тенденцій, оцінки водного балансу та моніторингу сезонних посух.

2) MOD16A2 Version 6.1 – Evapotranspiration/Latent Heat Flux – комбінований продукт місії MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), який містить 8-денні середні значення евапотранспірації та латентного теплового потоку з просторовою роздільною здатністю 500 м на піксель. Дані використовуються для оцінки втрат води з поверхні суші та рослинності внаслідок випаровування та транспірації, що є ключовими компонентами водного балансу.

Крім того, розроблений алгоритм дозволяє обчислювати основні вегетаційні та вологісні індекси – EVI (Enhanced Vegetation Index) та MSI (Moisture Stress Index), які є важливими показниками стану рослинності та вологості поверхні. Їх використання забезпечує детальне відображення просторово-часових закономірностей розвитку та поширення посух, а також дозволяє виявляти зони екологічного стресу у межах басейну.

Виклад основного матеріалу. Розроблена просторово-часова модель розподілу опадів у басейні річки Дністер (рис. 1) демонструє виражену територіальну та сезонну мінливість. Аналіз середньомісячних значень показує, що у верхній частині басейну спостерігається найбільша кількість опадів – понад 69 мм на місяць, що зумовлено впливом орографічних факторів Карпатського регіону. Натомість у нижній частині басейну, поблизу узбережжя Чорного моря, кількість опадів істотно менша – до 32 мм на місяць. Часовий аналіз опадів за період 2014–2024 рр. засвідчив значні міжрічні та сезонні коливання, з характерними піковими значеннями у весняно-літній період та мінімумами взимку,

що відображає природну циклічність кліматичних процесів у регіоні.

Просторовий розподіл середньомісячної евапотранспірації (рис. 2) виявляє контрастну залежність відносно опадів: у нижній частині басейну спостерігаються вищі показники випаровування, тоді як у гірських районах – нижчі, що свідчить про вплив температурного та ландшафтного градієнтів на водний баланс території.

Розрахований водний баланс, визначений як різниця між обсягами опадів (P) та евапотранспірації (ET), демонструє виражену просторово-часову мінливість у межах басейну річки Дністер (рис. 3).

У верхній частині басейну переважають умови позитивного водного балансу, де кількість опадів перевищує втрати через евапотранспірацію, що сприяє поповненню запасів ґрунтових і підземних вод. Натомість у нижній частині басейну спостерігається негативний баланс, який відображає дефіцит вологи та потенційні ризики виснаження водних ресурсів, особливо в посушливі сезони. Часовий аналіз за період дослідження засвідчив чітку сезонну динаміку, із чергуванням періодів надлишку (весняно-літній сезон) та дефіциту (літньо-осінній період) водних ресурсів. У місяці з підвищеними опадами спостерігається позитивний водний баланс, що забезпечує відновлення та стабілізацію водного режиму річки. Натомість у посушливі місяці з високими значеннями евапотранспірації формується негативний баланс, який може призводити до зниження рівня поверхневих і підземних вод, посилення екологічного стресу та порушення стабільності водних екосистем.

На рисунку 4 представлено поєднання просторових і часових даних, що забезпечує комплексне уявлення про стан рослинності та динаміку вологості в межах досліджуваної території.

Карта середньомісячного індексу рослинності (EVI) відображає просторовий розподіл продуктивності рослинного покриву, тоді як карта середньомісячного модифікованого індексу вологості (MSI) демонструє вміст вологи в рослинності та ґрунті.

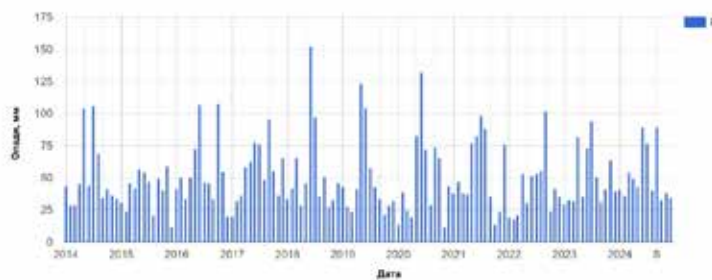
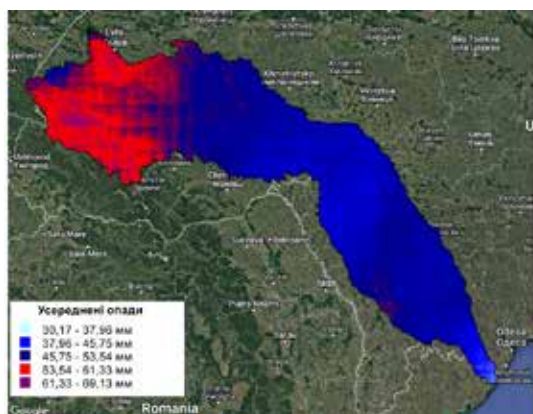


Рис. 1. Середня кількість опадів у басейні річки Дністер (ліворуч) та середньомісячна кількість опадів у 2014–2024 роках (праворуч)

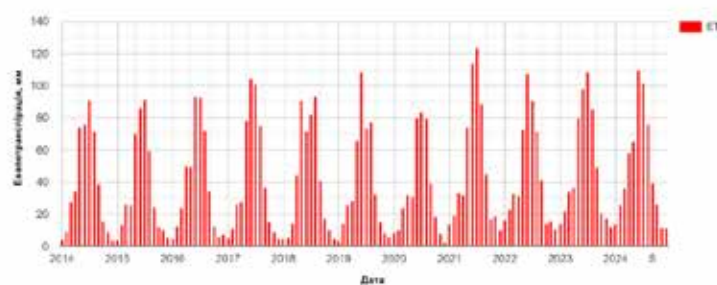
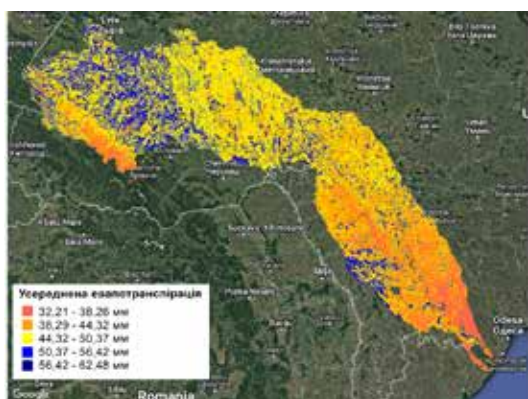


Рис. 2. Середня евапотранспірація в басейні річки Дністер (ліворуч) та середньомісячна евапотранспірація у 2014–2024 роках (праворуч)

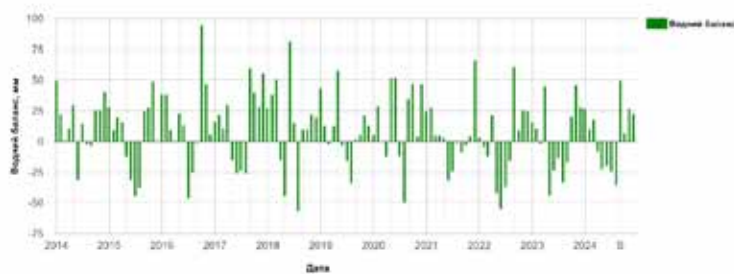
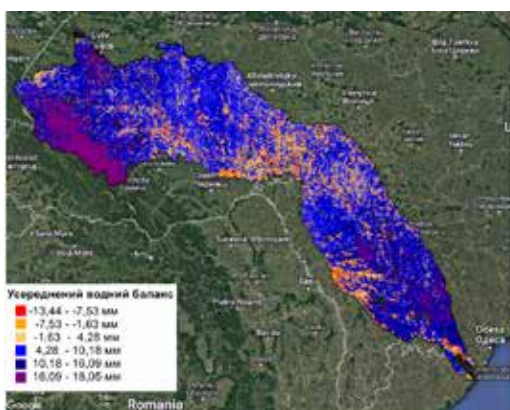


Рис. 3. Середній водний баланс у басейні річки Дністер (ліворуч) та середньомісячний водний баланс у 2014–2024 роках (праворуч)

Графік часових рядів ілюструє зміни показників EVI та MSI у період із січня 2017 року по жовтень 2024 року, що дозволяє детально простежити сезонні та міжрічні коливання обох індексів. Значення EVI характеризуються вираженими піковими періодами, які відповідають фазам активної вегетації, тоді як MSI демонструє частіші та більш варіативні зміни, що свідчить про динамічні коливання вологості під впливом погодних умов і кліматичних факторів. Поєднання просторових і часових даних дозволяє глибше зрозуміти взаємозв'язок між станом рослинності та гідрологічними умовами, а також виявити території, схильні до посух чи вологості дефіциту.

Головні висновки. Територія басейну Дністра стикається з проблемами, пов'язаними зі зміною клімату, неефективним управлінням ресурсами та наслідками російської військової агресії, що призводить до значного дефіциту води. У свою чергу, ці проблеми негативно впливають на екосистеми, громади та економіку, спричиняючи коливання річкового стоку, погіршення якості води, зниження рівня ґрунтових вод та збільшення частоти посух. Проведений геопросторовий аналіз показав значну

мінливість кількості опадів, евапотранспірації та водного балансу в межах досліджуваної території. Водний баланс є позитивним у верхній частині басейну, що свідчить про достатню забезпеченість водними ресурсами, тоді як для нижньої частини басейну характерним є дефіцит водних ресурсів. Отримані результати підкреслюють необхідність ефективних стратегій управління для вирішення проблеми сезонної мінливості доступності води та забезпечення стабільності екосистеми.

Перспективи використання результатів дослідження. Використання передових технологічних інструментів, зокрема хмарної геоінформаційної платформи Google Earth Engine, є необхідним для комплексного моніторингу водних ресурсів, оцінки ефективності стратегій управління та адаптації до змін клімату, а також збереження екологічного ландшафту басейну Дністра. Розроблений для басейну Дністра скрипт, що дозволяє здійснити оцінку водного балансу на основі відкритих даних супутникових спостережень, може бути адаптований до інших територій, що дозволить ширше застосовувати запропоновану методологію і потенційно сприяє більш ефективному управлінню водними ресурсами.

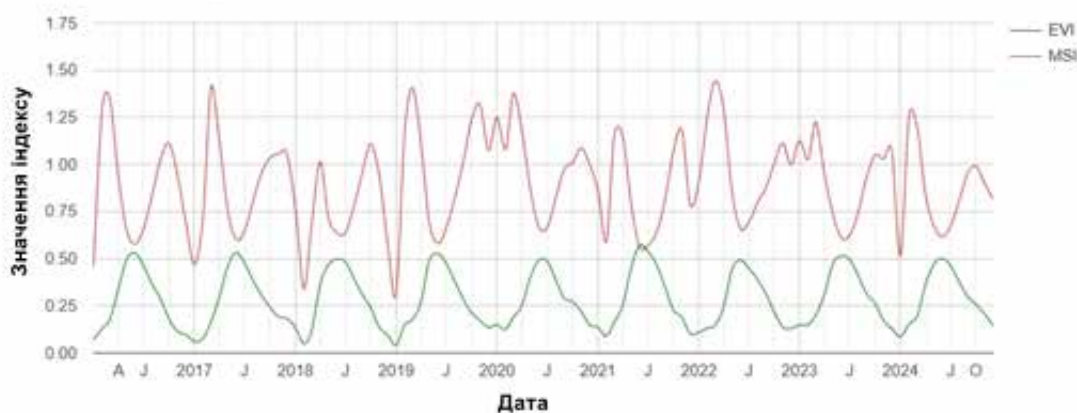
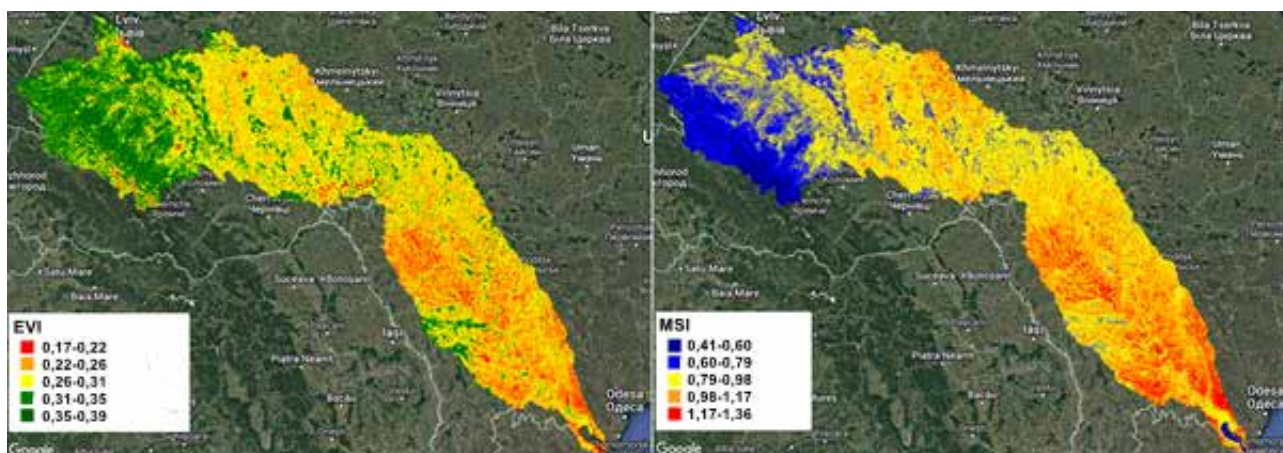


Рис. 4. Середні значення EVI (вгорі ліворуч), середні значення MSI (вгорі праворуч) та часовий ряд для індексів (внизу)

Література

- Didovets, I., Krysanova, V., Hattermann, F. F., del Rocio Rivas López, M., Snizhko, S., Müller Schmied, H. Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020. № 32, 100761. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2020.100761>.
- Popov, M., Michaelides, S., Stankevich, S., Kozlova, A., Piestova, I., Lubskiy, M., Titarenko, O., Svideniuk, M., Andreiev, A., & Ivanov, S. Assessing long-term land cover changes in watershed by spatiotemporal fusion of classifications based on probability propagation: The case of Dniester river basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2021. № 22, 100477. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2021.100477>.
- Davybida, L. Water balance assessment using Google Earth Engine: case of the Dniester River Basin. *18th International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*. 2025. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510109>.
- Пилипчук О.В. Геоекологія річково-басейнової системи верхнього Дністра: монографія / за ред. І.П. Ковальчука. Львів–Київ: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 284 с.
- Шибанова, А. М., Погребенник, В. Д., Мітрясова, О. П., Руда, М. В., Джумеля, Е. А., Паславський, М. М. Екологічне оцінювання якості води річки Дністер. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2021. 31(5), 74-78. <https://doi.org/10.36930/40310511>.
- Popov, M., Michaelides, S., Stankevich, S., Kozlova, A., Piestova, I., Lubskiy, M., Titarenko, O., Svideniuk, M., Andreiev, A., Ivanov, S. Assessing long-term land cover changes in watershed by spatiotemporal fusion of classifications based on probability propagation: The case of Dniester river basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2021. 22, 100477. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2021.100477>.
- Adamenko, Y. S., Arkhypova, L. M., & Mandryk, O. M. Territorial Normative of Quality of Hydroecosystems of Protected Territories. *Hydrobiological Journal*. 2017. № 53(2), 50–58. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v53.i2.50>.
- Loboda, N. S., Kozlov, M. O., Katynska, I. V. Evaluation of water resources changes of the Mountain Dniester in 20th century following the RCP8.5 scenario and based on the "climate-runoff" model. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. 2021. № 28, 48–64. <https://doi.org/10.31481/UHMJ.28.2021.05>.

9. Grebin V. Forecasting the Runoff on Rivers of the Dnister River Basin According to the REMO Numeric Climatic Model. *World Science*. 2018. № 9(37), 26-32. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30092018/6131.
10. Mohajerani, H., Zema, D. A., Lucas-Borja, M. E., & Casper, M. Understanding the water balance and its estimation methods. *Precipitation: Earth Surface Responses and Processes*, 2021. pp. 193–221. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822699-5.00019-7>.
11. Poortinga, A., Nguyen, Q., Thwal, N.S., Nicolau, A.P. Water Balance and Drought. Cloud-Based Remote Sensing with Google Earth Engine. *Springer*, Cham. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26588-4_44.

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025