

ЕКОЛОГІЯ

<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-29>

УДК 504.064:556.5:519.876.5(477)

Надійшла 1 квітня 2025 р.

Прийнята 2 травня 2025 р.

Сезонно-просторова динаміка ентропійно-зваженої оцінки якості поверхневих вод України

Віталій Безсонний¹

к. техн. н., доцент, кафедра готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій,

¹ Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Харків, Україна,

e-mail: bezsonny@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>;

Олег Третьяков²

д. техн. н., професор, кафедра цивільної та промислової безпеки імені Героя України Чуба О.С.,

Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,

e-mail: mega_ovtr@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0002-0457-9553>;

Леонід Пляцук³

д. техн. н., професор, зав. кафедри екології та природоохоронних технологій,

Сумський державний університет, Суми, Україна,

e-mail: l.plyacuk@ecolog.sumdu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-0095-5846>;

Роман Пономаренко⁴

д. техн. н., професор, т.в.о. начальника Інституту наукових досліджень з цивільного захисту,

Національний університет цивільного захисту України, Київ, Україна,

e-mail: indcz@nuczu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-6300-3108>;

Оксана Давидова¹

д. екон. н., професор, зав. кафедри готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій,

e-mail: davydova_oks@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0003-3045-9464>

У статті розглянуто підхід до оцінювання якості поверхневих вод України на основі ентропійно-зваженого індексу з урахуванням сезонної та просторової динаміки. В умовах посилення антропогенного тиску та кліматичних змін зростає актуальність удосконалення методик екологічного моніторингу, що базуються на об'єктивному врахуванні варіабельності гідрохімічних параметрів. Ентропія, як кількісна міра невизначеності, застосовується для зважування інформативності кожного показника якості води, дозволяючи створити більш чутливий і достовірний інтегральний індекс, ніж традиційний. Для аналізу використано відкриті дані державного моніторингу якості води за понад 540 пунктами спостережень у річкових басейнах України (Дніпро, Дністер, Дунай, Дон, Вісла, Південний Буг, Приазов'я та Причорномор'я). Було враховано п'ять сезонних періодів (зима, весна, межень, мілководдя, осінь) і 10 ключових гідрохімічних показників. Розраховані значення ентропійно-зваженого індексу класифікувались за семикласною шкалою, що дозволило виявити найбільш забруднені регіони та періоди. Результати демонструють чітку сезонну диференціацію: найчистіша вода спостерігається взимку та навесні, тоді як найбільш критичні значення фіксуються у період мілководдя та восени. Особливо забрудненими виявились басейни Південного Бугу, Причорномор'я та Приазов'я, що потребує пріоритетного екологічного втручання. Ентропійно-зважений індекс продемонстрував високу чутливість до просторово-часових змін, виявивши вплив як природних (гідрологічні умови), так і техногенних факторів (промислові та сільськогосподарські скиди). Проведено картографування результатів, що дозволяє візуалізувати екологічний стан річкових систем та сприяє прийняттю рішень у сфері водної політики. Запропонована методика має потенціал для впровадження в системи екологічного моніторингу та планування заходів з управління якістю води на регіональному рівні.

Ключові слова: ентропійно-зважений індекс забрудненості води (EI3B); поверхневі води; екологічний моніторинг; сезонна варіація; просторовий аналіз.

Як цитувати: Безсонний Віталій, Третьяков Олег, Пляцук Леонід, Пономаренко Роман, Давидова Оксана (2025). Сезонно-просторова динаміка ентропійно-зваженої оцінки якості поверхневих вод України. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 384-400. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-29>

In cites: Bezsonnyi Vitalii, Tretyakov Oleg, Plyatsuk Leonid, Ponomarenko Roman, Davydova Oksana (2025). Seasonal and spatial dynamics of entropy-weighted water quality assessment in surface waters of Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 384-400. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-29> [in Ukrainian]

Вступ. Забезпечення екологічної безпеки водних басейнів є надзвичайно актуальним завданням у світлі виконання Цілей сталого розвитку ООН, зокрема ЦСР 6 («Чиста вода та санітарія»)

та ЦСР 12 («Рациональне споживання і виробництво»). Вода відіграє ключову роль у підтримці сталого розвитку держав, проте зростання антропогенного тиску та кліматичні трансформації

© Безсонний Віталій, Третьяков Олег, Пляцук Леонід, Пономаренко Роман, Давидова Оксана, 2025

суттєво ускладнюють стабільне функціонування природних гідросистем і систем водопостачання. За оцінками ООН, близько 40% населення світу відчуває дефіцит водних ресурсів, а понад 1,7 мільярда осіб, які проживають у річкових басейнах, потребують поліпшення систем постачання безпечної води. Зокрема, 783 мільйони осіб не мають доступу до чистої питної води, що не лише впливає на добробут населення, але й прямо стосується дотримання фундаментальних прав людини. У межах проєкту «ЕкоЗагроза» в Україні ведеться моніторинг у понад 540 контрольних точках, де виявлено перевищення допустимих концентрацій токсичних речовин, зокрема пестицидів і важких металів. У першій половині 2024 року підприємства завдали збитків на понад 21 мільйон гривень через порушення водоохоронного законодавства. Це підкреслює необхідність впровадження нових методик оцінювання стану водних ресурсів та стратегічного планування екологічної безпеки басейнів.

Комплексний аналіз літератури показує, що ефективне оцінювання сезонної та просторової динаміки якості поверхневих вод вимагає застосування сучасних цифрових технологій, методів аналітичної обробки даних та інтегрованого екологічного підходу. Історично, концепція індексного підходу бере початок із 1965 року, коли Хортон запропонував першу модель індексу якості води на основі емпіричних даних і порівняльного аналізу [1 – 6]. Методологія передбачала вибір релевантних показників, їхнє зважування залежно від значущості та створення шкали для інтегрування числового індексу. Водночас сучасна практика все частіше віддає перевагу ентропійно-зваженим індексам, які демонструють вищу чутливість і точність при виявленні регіональних або сезонних змін у якості води [7 – 9].

Ентропія в оцінці якості води застосовується як кількісна характеристика невизначеності у розподілі хімічних компонентів та забруднюючих речовин у водному середовищі. Такий підхід дозволяє оцінити ступінь хаотичності або варіативності системи, що є надзвичайно важливим для аналізу стану екосистем водних об'єктів [7 – 9].

Інтегральна оцінка якості води за допомогою ентропійно-зваженого індексу базується на моделі Water Quality Index (WQI), яка враховує низку гідрохімічних параметрів, зокрема загальну мінералізацію, біохімічне споживання кисню, рН тощо [10, 11]. Кожен із цих параметрів відіграє різну роль у формуванні загального екологічного профілю водойми і тому отримує індивідуальну вагу, розраховану відповідно до його інформаційної ентропії.

На відміну від підходів, де вагові коефіцієнти визначаються експертно, методика з використан-

ням ентропії дозволяє врахувати фактичну мінливість параметрів у різних точках моніторингу. Чим вища мінливість або ентропія параметра, тим більшою є його впливовість і, відповідно, вища вага в інтегральному індексі [12].

Такий підхід дозволяє уникнути суб'єктивності у визначенні вагових коефіцієнтів, яка притаманна традиційним методам, де всі параметри часто розглядаються як рівнозначні або ваги задаються за емпіричними оцінками [13]. Як наслідок, значна частина критично важливої інформації про якість води може бути втрачена. Агрегування нормованих значень параметрів з урахуванням їхніх ентропійних ваг формує підсумковий показник – ентропійно-зважений індекс забрудненості води (ЕІЗВ). Так, дослідники [14] вперше продемонстрували застосування ЕІЗВ для оцінки якості підземних вод у регіоні Ленджанат (Іран), де було доведено, що ентропійна вага значно покращує чутливість індексу до гідрохімічних змін. Подібне дослідження у сільській місцевості Індії представлено у роботі [15], де ЕІЗВ застосовували у поєднанні з аналізом просторового розподілу іонів. У контексті країн Глобального Півдня проаналізовано якість ґрунтових вод у місті Ібадан (Нігерія), використовуючи саме ентропійно-зважений підхід. Дослідники виявили, що найбільший вплив на якість питної води мали нітрати та важкі метали, розподілені нерівномірно залежно від типу ґрунту [16]. У Південній Африці, дослідженням зосереджено увагу на сезонній динаміці якості поверхневих вод, інтегруючи дані з Google Earth Engine та супутникових знімків Sentinel-2 для аналізу змін у водних площах та пов'язаного з ними забруднення [17]. Оцінка просторово-сезонної варіативності також представлена в роботі [18], де було здійснено аналіз забруднення ґрунтових вод із застосуванням ентропійних методів, що продемонстрували вищу ефективність порівняно з традиційними індексами. У роботі [19] реалізували багатофакторний підхід до класифікації ґрунтових вод Ірану, інтегруючи ЕІЗВ та індекс просторової автокореляції, що дозволило не лише оцінити якість води, але й виділити регіони з найбільшим ризиком забруднення. У дослідженні прибережних вод Бангладешу запропонували комбінацію модифікованого інтегрованого індексу якості води з ентропійно-зваженим, щоб зменшити перекоси через крайові значення параметрів. Вони довели, що така інтеграція забезпечує стабільніші результати під час сезонних змін [20]. Ще одним значним внеском є робота [21], яка застосовувала ЕІЗВ у сільській місцевості штату Телангана (Індія). Результати вказали на те, що параметри, пов'язані з антропогенним тиском, мають вищу ентропійну значимість. У Нігерії [22] впроваджено багатопоказникову систему оціню-

вання якості води, де ЕІЗВ поєднувався з іншими індексами, зокрема іонного забруднення. Такий підхід дозволив детально класифікувати джерела питної води за рівнем ризику. У роботі [23] здійснено комплексну гідрохімічну оцінку ґрунтових вод для потреб зрошення та питного водопостачання в південній Індії. Дослідження підтвердило ефективність ентропійно-зваженого аналізу у поєднанні з традиційними методами (наприклад, ІЗВ та індекс надійності). У подібному ключі, [24] провели дослідження у міських і передміських районах Ібадану (Нігерія), де особливу увагу приділили впливу урбанізації на якість поверхневих вод. Аналіз проводився з використанням ентропійного підходу та кластерного аналізу для виявлення просторових аномалій. Дослідниками [25] проаналізовано якість води у побутових джерелах у південно-західній Нігерії. ЕІЗВ продемонстрував високу чутливість до підвищених концентрацій заліза та нітратів, що пов'язані з інтенсивним сільськогосподарським навантаженням. В Африці особливо цікавим є дослідження [26], яке розглядало сезонну та просторову варіативність водних параметрів в мангровому гірлі річки Ньонг (Камерун). Використання мультिवаріантного аналізу дозволило виявити сезонно-специфічні патерни забруднення. Робота [27] досліджує вплив землекористування на сезонну змінність якості води озера Мухазі (Руанда). Автори інтегрували ГІС-дані та індекси якості води, що дозволило детально відтворити просторову структуру забруднення і його залежність від сільськогосподарських і урбанізованих територій. У дослідженні [28] було застосовано багатовимірний статистичний аналіз до оцінки якості поверхневих вод у південній Нігерії. Автори підкреслюють перевагу поєднання ентропійної ваги з факторним аналізом для класифікації гідрохімічних типів вод. В роботі [29] запропоновано модель оцінки якості води в місці злиття річок Вей та Хуанхе (Китай), яка поєднує ЕІЗВ, аналіз основних компонентів та картографічну візуалізацію. Виявлено сильну сезонну залежність забруднення та локальні джерела впливу. У дослідженні [30] розглянуто вплив цифровізації на економічні процеси, однак їхня модель обробки даних є релевантною і для моніторингу екологічних систем. Розроблені алгоритми дозволяють об'єднувати великі обсяги інформації, враховуючи просторово-часові зміни, що у контексті водних досліджень дає змогу моделювати зміни якості води залежно від зовнішніх впливів у режимі реального часу. У статті [31] запропоновано побудову зон сумнівних рішень у багатовимірних просторах небезпечних факторів. Хоча початково ця методика була орієнтована на техногенні системи, підхід до розмежування зон ризику за допомогою багатофакторного аналізу

чудово адаптується для класифікації водних басейнів за рівнем екологічної небезпеки на основі ентропійно-зважених показників. Робота [32] присвячена оцінці структурних змін у сталому розвитку. Автори акцентують увагу на системному підході до динамічного аналізу складних систем. Перенесення цих принципів на екологічні дослідження дозволяє краще зрозуміти, як сезонні зміни впливають на функціонування водних екосистем, зокрема в умовах антропогенного навантаження. Дослідники [33] у своїй статті формують науково-теоретичні засади стратегії розвитку територій, акцентуючи на необхідності врахування просторово-часових змін при прийнятті управлінських рішень. Для нашого дослідження це важливо тим, що дозволяє обґрунтувати інтеграцію екологічних показників (зокрема сезонно-зважених індексів якості води) у системи стратегічного планування управління водними басейнами. У роботі [34] представлено аналіз застосування методів машинного навчання та предиктивної аналітики для аналізу посткризових тенденцій. Використання аналогічних інструментів у екологічних дослідженнях дозволить прогнозувати зміну якості води залежно від сезонних впливів, що має практичне значення для адаптивного управління водними ресурсами.

Безпосередньо до тематики інтегрованої оцінки водних ресурсів належить дослідження [35]. У роботі здійснено багатопараметричну оцінку стану джерел водопостачання на основі показників екологічного ризику. Автори використовували підходи, що враховують не лише фізико-хімічні показники, але й їхню просторово-часову змінність, що важливо для оцінки сезонних коливань якості води. Моделювання кисневого режиму водосховища, проведене у роботі [36], дозволяє зрозуміти динаміку біохімічного споживання кисню в залежності від температурних і сезонних чинників. Врахування таких змін є критичним для правильного розрахунку ентропійно-зважених індексів. Термодинамічний підхід до аналізу екологічних систем, запропонований у роботі [37], дозволяє глибше осмислити механізми деградації екосистем під впливом антропогенних чинників. Концепція антиентропії як індикатора стабільності системи може бути застосована для моніторингу змін екологічного стану водойм у довгостроковій перспективі. Огляд [38] зосереджується на використанні інформаційної ентропії у системах моніторингу водних ресурсів. Автор продемонстрував, що оптимальне розташування пунктів спостереження значно підвищує інформативність моніторингу та ефективність виявлення просторово-часових змін у якості води. Вплив військових дій на водні об'єкти розглядається у дослідженні [39]. Встановлено, що підвищене навантаження на

водні екосистеми під час бойових дій призводить до загострення сезонної динаміки забруднення, а це потребує впровадження адаптивних стратегій моніторингу та захисту водних ресурсів у кризових ситуаціях. У дослідженні [40] здійснено апробацію ентропійно-зваженої оцінки якості води для річки Дніпро, що дозволило виявити істотну різницю між холодним та теплим періодами року. Це підкреслює необхідність врахування сезонних особливостей при розрахунку екологічних індексів. Вплив господарсько-побутових стоків на якість водних ресурсів проаналізовано у роботі [41]. Автор вказує на зростання екологічного ризику в теплий період року, що корелює з підвищеним рівнем евтрофікації та забруднення водних об'єктів. Інтегрована оцінка джерел забруднення Дніпровського водосховища проведена у дослідженні [42]. Виявлено, що основними чинниками погіршення якості води є органічні та азотні сполуки, що вимагає застосування сезонно-зважених стратегій управління якістю води. Оцінка складових екологічної безпеки басейну Сіверського Дінця у роботі [43] підкреслює важливість показників кисневого режиму (вміст розчиненого кисню та біохімічна потреба в кисні) для моніторингу довгострокових змін якості води.

У контексті українських реалій спостерігається відсутність систематизованих досліджень, які об'єднують сезонну динаміку, ентропійне зважування та просторове моделювання. Саме тому розробка таких підходів, що ґрунтуються на нові відкритих даних, є надзвичайно актуальною.

Методи. Для дослідження використовувалися результати державного моніторингу якості поверхневих вод, надані Державним агентством водних ресурсів України. Дані охоплюють понад 540 пунктів спостереження, розташованих у басейнах основних річок України (Дніпро, Дунай, Дністер, Дон, Вісла, Південний Буг, річки Причорномор'я та Приазов'я). У дослідженні було враховано п'ять сезонних періодів: зима, весна, межень, мілководдя та осінь. Оцінка якості поверхневих вод здійснювалась на основі 10 ключових фізико-хімічних показників: рН, вміст розчиненого кисню, біохімічне споживання кисню (БСК₅), хімічне споживання кисню (ХСК), вміст амонійного азоту, нітратів, фосфатів, загального заліза, загальної жорсткості, загальної мінералізації.

Ці параметри було обрано на основі методичних рекомендацій ВООЗ, стандартів ЄС і чинного українського законодавства.

Визначення ентропійно-зваженого індексу здійснюється в декілька етапів [7 – 9]

1. Побудова вихідної матриці проб води і оцінюваних параметрів (1).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

де x_{ij} - концентрація i -ї речовини для j -го створу, мг/дм³.

2. Побудова нормованої матриці нормованих значення кожного оцінюваного параметра для усунення похибок, викликаних різними одиницями вимірювання.

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

де y_{ij} – нормоване значення i -ї речовини для j -го створу.

Нормоване значення параметру визначаємо за виразом (3):

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (3)$$

Нормоване значення для розчиненого у воді кисню визначаємо за виразом (4):

$$y_{ij} = \frac{(x_{ij})_{\max} - x_{ij}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (4)$$

3. Обчислення інформаційної ентропії (Е) кожного параметра за формулою, введеної К.Шенноном (5):

$$E_n = - \left(\frac{1}{\ln n} \right) \sum_{i=1}^m V_{ij} \ln V_{ij} \quad (5)$$

де n – кількість точок відбору проб, а

V_{ij} – ймовірність появи нормалізованого значення (v_{ij}) оцінюваного параметра j у i -й вибірці, що визначається наступним чином:

$$V_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sum v_{ij}}. \quad (6)$$

4. Обчислення ентропійних ваг (W), щоб параметрам з нижчою ентропією або мірою безпорядку присвоювалася таким чином більша вага:

$$W_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^t (1 - E_j). \quad (7)$$

Параметрам, у яких менша ентропія, присвоюється більша вага, оскільки вони вказують на наявність більш структурованої системи, яка є більш організованою і менш випадковою, а тому може бути більш інформативною для оцінки якості води.

5. Агрегація ваг ентропії та шкали оцінки якості в індекс ЕІЗВ виражається наступним чином:

$$EWQI = \sum_{j=1}^n W_j U_j, \quad (8)$$

де EWQI – ентропійнозважений індекс забрудненості води;

U_j для кожного параметра задається як відношення контрольованого значення j -го параметра (I_j) до його стандартного значення (S_j):

$$U_j = \left(\frac{I_j}{S_j} \right). \quad (9)$$

Розраховані значення ЕІЗВ класифікувались за семикласною шкалою:

- I – дуже чиста (ЕІЗВ ≤ 0,3);
- II – чиста (0,3 < ЕІЗВ ≤ 1);
- III – помірно забруднена (1 < ЕІЗВ ≤ 1,5);
- IV – забруднена (1,5 < ЕІЗВ ≤ 2);
- V – брудна (2 < ЕІЗВ ≤ 4);
- VI – дуже брудна (4 < ЕІЗВ ≤ 8);
- VII – надзвичайно брудна (ЕІЗВ > 8).

Для розрахунків у якості нормативного значення було використано показники верхньої межі 2-го класу якості води за ДСТУ 4808:2007. Джерела централізованого питного водопостачання.

Гігієнічні і екологічні вимоги щодо якості води та правил вибирання.

Результати. Річкові басейни, що є джерелом питної води та основою екосистемних послуг, потребують ефективних підходів до управління, спрямованих на забезпечення їхньої екологічної безпеки. Ентропія, яка є мірою невизначеності та хаосу в системі, дозволяє кількісно оцінювати стан річкових басейнів і виявляти фактори, що найбільш впливають на їхню стабільність. Використовуючи методику визначення ентропійно-зваженого індексу стану водного об'єкту було розраховано ентропійно-зважені індекси якості води для кожного пункту моніторингу на основі даних моніторингу поверхневих вод Державного водного агентства України.

Результати аналізу ентропійно-зваженого індексу забрудненості води (ЕІЗВ) за річковими басейнами та сезонами наведено в табл. 1 та на графіках (рис. 1).

Таблиця 1 / Table 1

Розподіл середніх значень ЕІЗВ за басейнами та періодами /
Distribution of average EWQI values by basins and periods

Басейн річки	Весна	Зима	Межень	Мілководдя	Осінь
Вісла	0,74	0,83	0,93	9,89	10,01
Дніпро	0,50	0,41	0,52	4,75	5,16
Дністер	0,80	1,61	1,37	11,35	6,59
Дон	0,68	0,70	0,84	6,93	6,90
Дунай	0,33	0,28	0,48	2,71	6,16
Південний Буг	1,58	2,33	0,59	13,54	11,60
Річки Приазов'я	0,88	0,95	1,17	12,39	11,71
Річки Причорномор'я	0,87	0,83	1,11	8,29	14,23

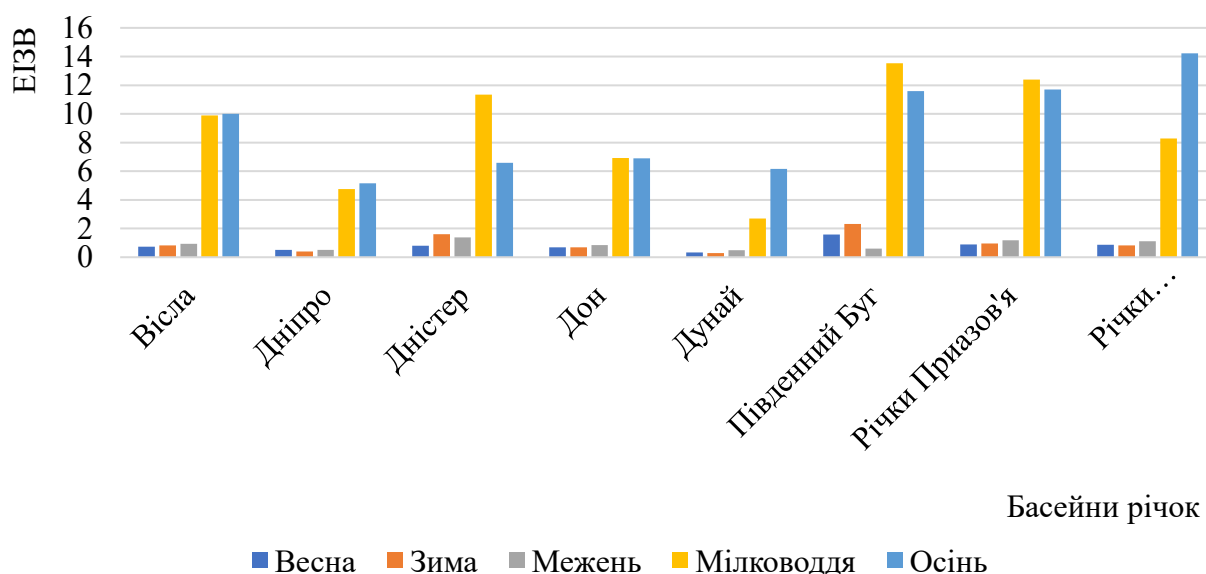


Рис. 1. Розподіл середніх значень ЕІЗВ за басейнами та періодами /
Fig. 1. Distribution of average EWQI values by basins and periods

Для весняного періоду найчистіші води спостерігаються в басейні Дунаю (ЕІЗВ = 0,33; «чиста вода»), а найзабрудненіші – в Південному Бугу (ЕІЗВ = 1,58; «забруднена вода»). Зимового періоду найчистіша вода знову спостерігається у басейні Дунаю (ЕІЗВ = 0,28; «дуже чиста»); Південний Буг демонструє значно вищий рівень забруднення (ЕІЗВ = 2,33; «брудна вода»). Під час межени переважають показники помірного забруднення у більшості басейнів. Найчистіший – Дунай (ЕІЗВ = 0,48; «чиста вода»), а найбрудніший – Дністер (ЕІЗВ = 1,37; «помірно забруднена вода»). Для періоду мілководдя спостерігається найвищий рівень забруднення у всіх басейнах. Наприклад, Південний Буг (ЕІЗВ = 13,54) та річки Приазов'я (ЕІЗВ = 12,39) характеризуються як «надзвичайно брудні». Восени забруднення залишається високим, особливо в басейнах Причорномор'я (ЕІЗВ = 14,23) та Південного Бугу (ЕІЗВ = 11,60), які залишаються у класі «надзвичайно

брудних». Загалом, найнижчі значення ЕІЗВ у весняний та зимовий періоди, а різке підвищення забруднення у період мілководдя, коли концентрація забруднень максимальна через зниження об'ємів води.

Найчистіші річки – Дунай та частково Дніпро, які утримують відносно низькі значення ЕІЗВ навіть у забруднених періодах. Найзабрудненіші – Південний Буг, річки Причорномор'я та Приазов'я в періоди мілководдя й осені. Сезонність відіграє ключову роль у формуванні якості поверхневих вод, зокрема через зміни гідрологічних умов. Найбільше забруднення відзначається в періоди низької водності, що вимагає посиленого моніторингу та впровадження адаптивних заходів управління якістю води, особливо в басейнах Південного Бугу та Причорномор'я. Для візуалізації отриманих даних були створені карти просторового розподілу значень ЕІЗВ (рис. 2 – 6).

На карті просторового розподілу ентропійно-

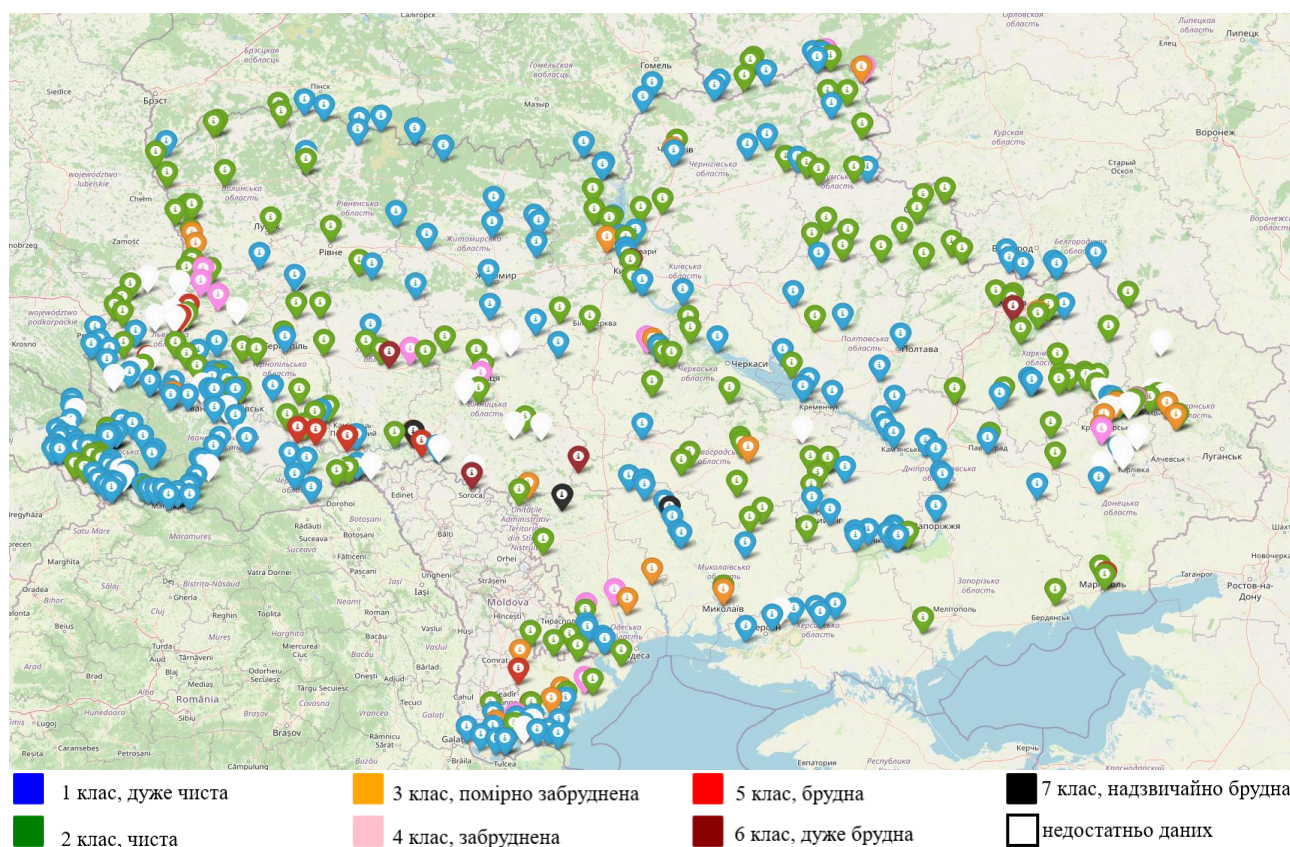


Рис. 2. Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Зима» /
Fig. 2. Spatial distribution of EWQI for the "Winter" period

зваженого індексу забруднення води (ЕІЗВ) для періоду «зима» (рис. 2) відображено якість води в річкових басейнах України за класифікацією, що охоплює сім рівнів забруднення: від «дуже чиста» (синій колір) до «надзвичайно брудна» (чорний колір). Спостерігається значна варіативність стану води залежно від басейну та географічного положення. До зон з найкращими показниками

відносяться річкові басейни Дунаю демонструють найнижчі значення ЕІЗВ, що вказує на чистоту води (І та ІІ класи), північні регіони України також мають переважно низькі значення ЕІЗВ (І–ІІ класи), що свідчить про відсутність значних антропогенних впливів. До регіонів із середнім рівнем забруднення відносяться Дністер і Дон, переважно відповідають III–IV класам якості води

(помірно забруднена та забруднена вода). Найбільш проблемними зонами є басейни Причорномор'я та Приазов'я характеризуються високими показниками ЕІЗВ, які відповідають VI–VII класам (дуже брудна та надзвичайно брудна вода). Показники забруднення також високі в басейні

Південного Бугу, де помітна інтенсивна антропогенна діяльність.

Карта просторового розподілу ЕІЗВ для періоду «Весна» (рис. 3) демонструє відносно кращий стан поверхневих вод у порівнянні з іншими сезонами, що пояснюється підвищеним водозабез-

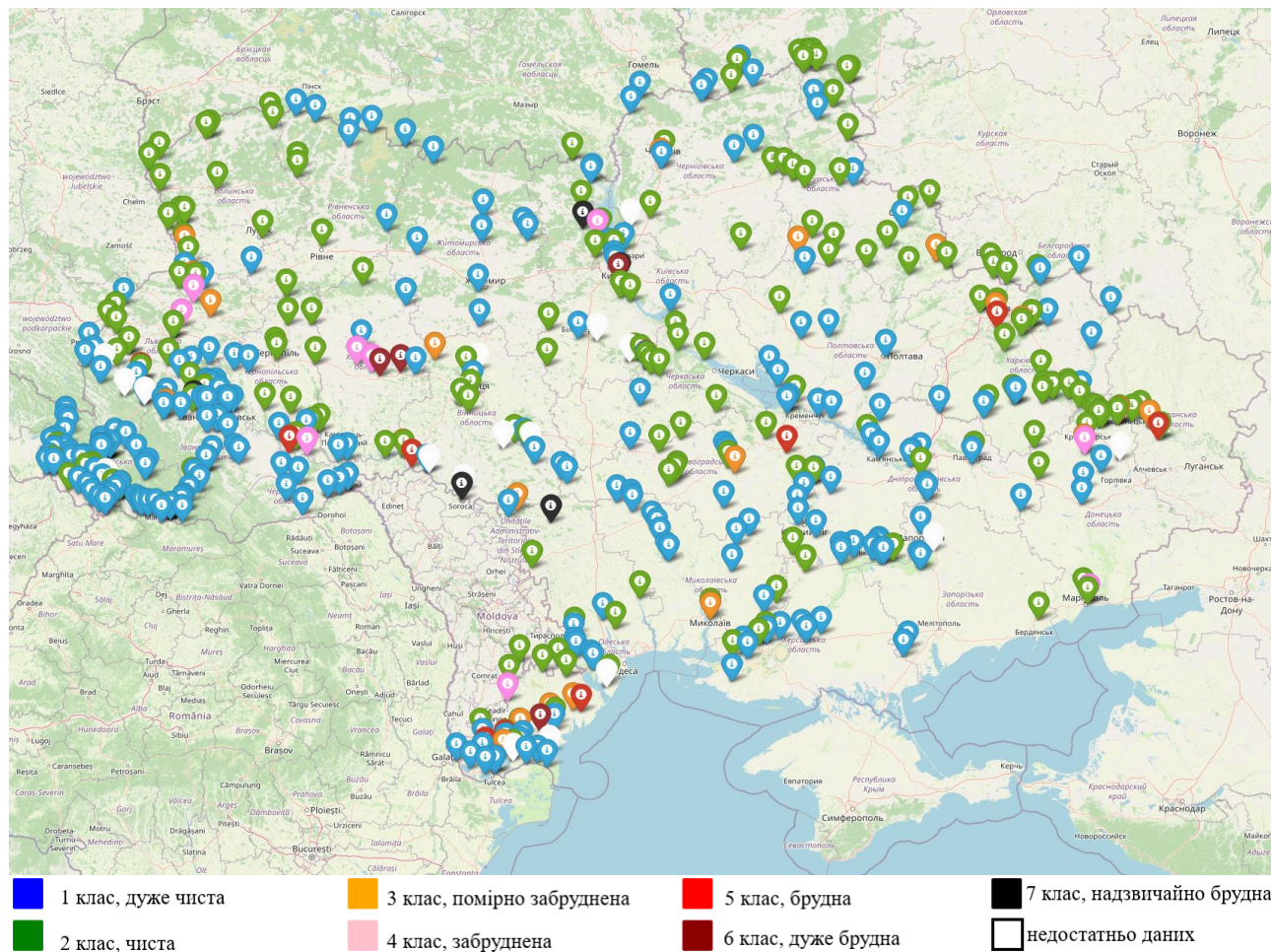


Рис. 3. Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Весна» /
Fig. 3. Spatial distribution of EQI for the “Spring” period

печенням через танення снігів і весняні паводки.

Проте якість води варіюється залежно від регіону і басейну. До регіонів з найкращими показниками (I–II класи, дуже чиста та чиста вода) відносяться Дунайський басейн, переважно сині та зелені позначки, що свідчить про дуже чисту та чисту воду, що може бути пов'язано з низьким рівнем індустріалізації та сприятливими природними умовами; басейни західних річок - у басейнах Вісла та Дністер значна кількість пунктів також належить до I та II класів. Регіони із середніми показниками забруднення (III–IV класи, помірно забруднена та забруднена вода) це - центральна частина України. У басейнах Дніпра та Дону спостерігається збільшення кількості жовтих і рожевих маркерів (III і IV класи), що свідчить про локальне антропогенне навантаження, пов'язане із сільським господарством та промисловістю. Річки Причорномор'я та Приазов'я мають кілька

точок з помірним рівнем забруднення.

До зон з високим рівнем забруднення (V–VII класи, брудна, дуже брудна та надзвичайно брудна вода) відносяться басейн Південного Бугу, спостерігаються червоні та чорні маркери, які вказують на значне забруднення води в кількох точках. Це може бути пов'язано з високим рівнем індустріалізації, урбанізації та сільськогосподарського стоку. У деяких точках Приазов'я фіксуються дуже високі значення ЕІЗВ (чорний колір), що свідчить про катастрофічний стан води в окремих місцях. У весняний період якість води в більшості регіонів покращується через розбавлення забруднюючих речовин унаслідок паводків. Це чітко видно у басейнах Дунаю, Вісли та частково Дністра. Найбільш проблемними залишаються басейни Південного Бугу, Причорномор'я та частково Дніпра, де навіть весняні паводки не компенсують вплив антропогенних джерел забруднення.

Карта просторового розподілу ЕІЗВ для періоду «межень» (рис. 4) демонструє специфічні особливості стану якості поверхневих вод у часи найнижчої водності, характерної для цього періоду.

Регіони з найкращими показниками (І–ІІ кла-

си, дуже чиста та чиста вода) це Дунайський басейн, де значна частина точок на карті залишається у синіх і зелених кольорах, що вказує на переважно чистий стан води, що підтверджує стійкість екосистеми навіть за низької водності. Західна Україна (Вісла), подібно до Дунаю, річки

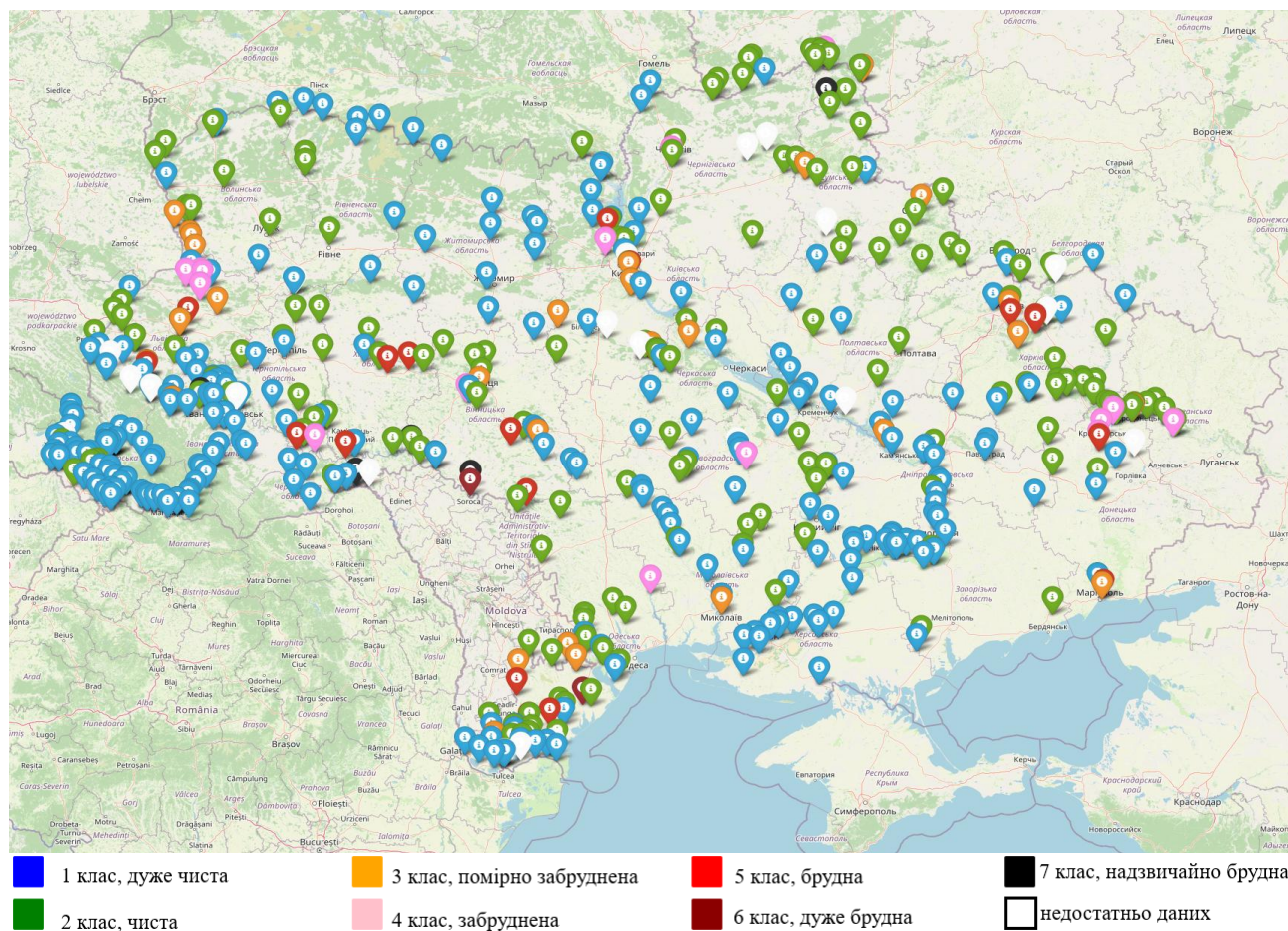


Рис. 4. Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Межень» /
Fig. 4. Spatial distribution of EQI for the “Low-flow” period

цього регіону здебільшого мають дуже чисту або чисту воду. У північній частині басейну Дніпра фіксується низький рівень забруднення. До регіонів із середніми показниками забруднення (III–IV класи, помірно забруднена та забруднена вода) відноситься Дністер, басейн якого у порівнянні з іншими регіонами демонструє зростання кількості точок жовтого та рожевого кольорів, що свідчить про помірний рівень забруднення. У басейнах Дону і Причорномор'я переважають значення III і IV класів, що відображає наявність антропогенного впливу та концентрацію забруднень через зниження водності. До регіонів з високим рівнем забруднення (V–VII класи, брудна, дуже брудна та надзвичайно брудна вода) входить Південний Буг, де декілька червоних і чорних точок відображають критичний стан води, зумовлений індустріальним і сільськогосподарським впливом; забруднення досягає високих рівнів у деяких точках басейну річок Причорномор'я, що свідчить про

значне антропогенне навантаження на ці екосистеми; в окремих місцях Річок Приазов'я фіксується надзвичайно високий рівень забруднення (VII клас). У період межені якість води в більшості річок погіршується через зменшення водного потоку, що збільшує концентрацію забруднюючих речовин.

Карта просторового розподілу ЕІЗВ (рис. 5) для періоду «мілководдя» демонструє найбільш критичний стан водних ресурсів, що обумовлено мінімальними об'ємами води у річках, які зумовлюють підвищену концентрацію забруднень. Цей період характеризується найвищими рівнями забруднення у багатьох регіонах України. До басейнів з найкращими показниками (I–II класи, дуже чиста та чиста вода) відноситься Дунайський басейн, де у порівнянні з іншими річковими басейнами, зони з синім і зеленим маркерами зберігаються лише в кількох місцях. Це свідчить про відносну стабільність водної екосистеми Дунайсь-

кого басейну навіть у період мілководдя. Частина річок басейну Вісли також демонструє відносно низькі значення забруднення, що пояснюється меншим антропогенним впливом. До регіонів із середніми показниками забруднення (III–IV класи, помірно забруднена та забруднена вода) відноситься Дністер. У басейні цієї річки домінують жовті та рожеві маркери, що свідчить про помірний рівень забруднення. Це може бути резуль-

татом зниження самоочищувальної здатності річки. Показники якості води в частинах басейнів Дніпра та Дону погіршуються, але залишаються у межах III–IV класів.

Регіони з високим рівнем забруднення (V–VII класи, брудна, дуже брудна та надзвичайно брудна вода) відноситься Південний Буг – видно численні червоні, темно-червоні та чорні маркери, що вказують на критично високий рівень за-

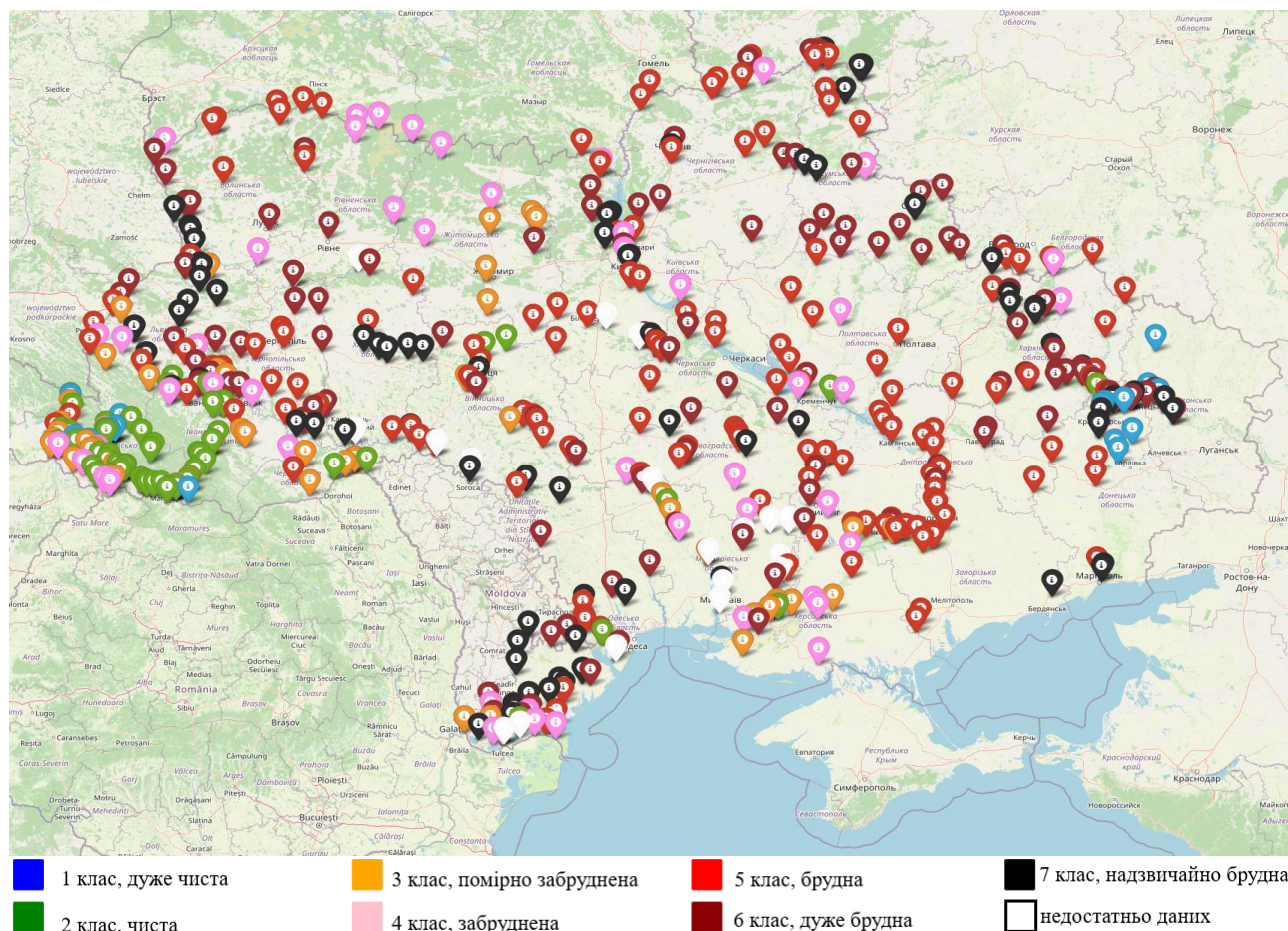


Рис. 5. Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Мілководдя» /
Fig. 5. Spatial distribution of EWQI for the “Shallow-water” period

бруднення. Основними джерелами проблем є промислові підприємства та аграрні стоки. В басейнах річок Причорномор'я та Приазов'я переважають значення VI–VII класів, що свідчить про катастрофічний стан води. Значна частина басейну Дніпра також відзначається високими значеннями ЕІЗВ, що підтверджує значний вплив антропогенних факторів, таких як промислове забруднення. Через низький рівень води, особливо в малих і середніх річках, в цей період рівень забруднення значно зростає.

Карта просторового розподілу ЕІЗВ для періоду «осінь» (рис. 6) відображає ситуацію із якістю поверхневих вод України наприкінці гідрологічного циклу, коли обсяги річкової водності знижуються після літнього сезону, але досягнення рівнів межени ще не спостерігається. Аналіз свідчить

про наявність значних регіональних контрастів у забрудненні вод, обумовлених як природними, так і антропогенними факторами.

Регіони з найкращими показниками якості води (I–II класи, дуже чиста та чиста вода) це західна частина України (басейни Дунаю та Вісли) – найбільша концентрація синіх і зелених маркерів вказує на високий екологічний стан води. Цей регіон демонструє стабільність якості води завдяки меншим обсягам антропогенного навантаження, ефективності самоочищувальних процесів та сприятливим природним умовам. Локальні чисті зони в центральних та північних частинах басейну Дніпра, ці річкові ділянки зберігають відносно низькі показники забруднення. Регіони із середніми рівнями забруднення (III–IV класи, помірно забруднена та забруднена вода) це басейни

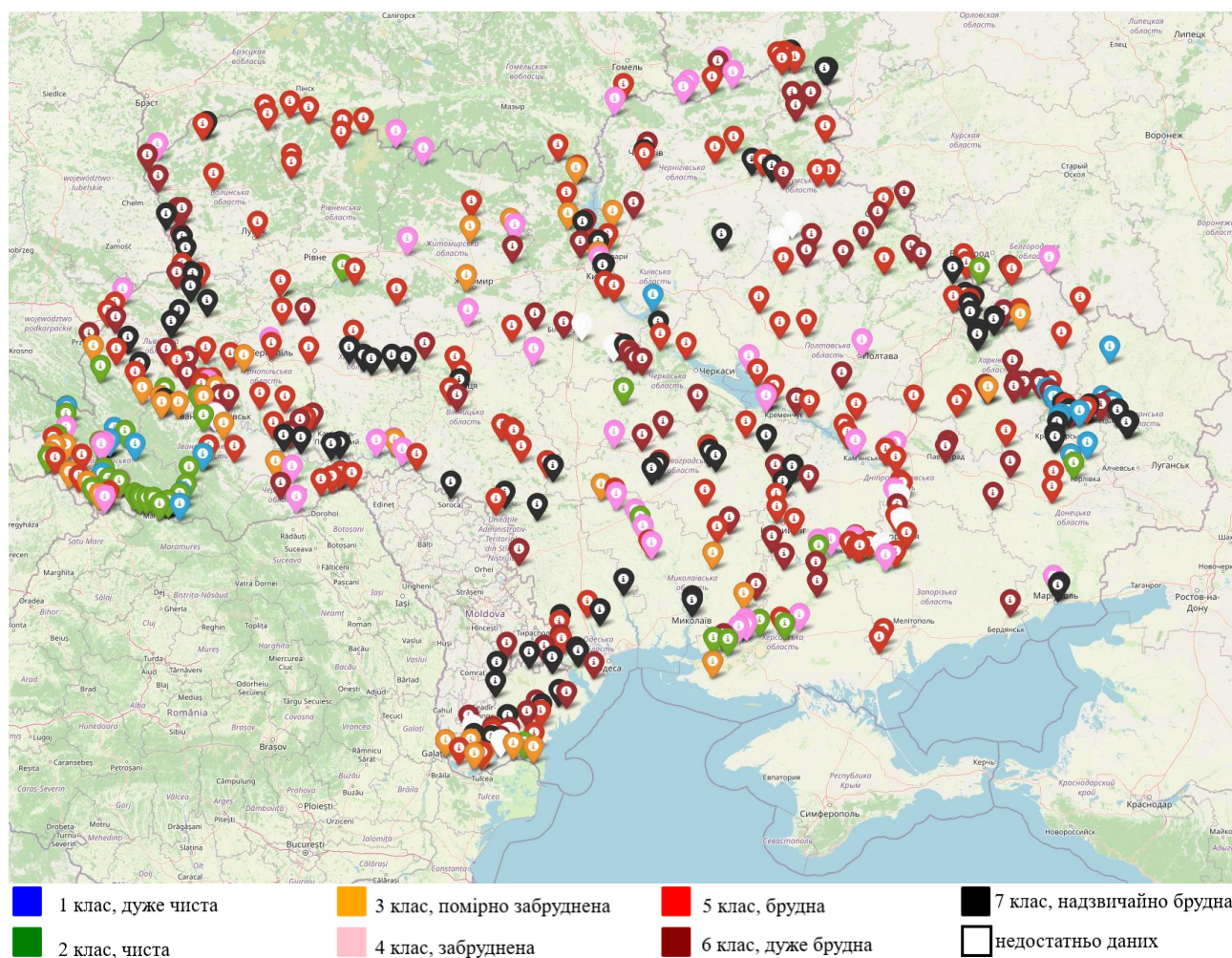


Рис. 6. Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Осінь» /
Fig. 6. Spatial distribution of EWQI for the “Autumn” period

Дністра та Дніпра, де значна кількість жовтих і рожевих маркерів свідчить про середній рівень забруднення води. Помірний екологічний стан цих зон обумовлений як природними умовами, так і локальними впливами сільського господарства та недостатньо очищених стічних вод. Частина річок Причорномор'я та Приазов'я, де також спостерігається помірне забруднення, що характерне для зони інтенсивного аграрного виробництва. Регіони з критичними показниками якості води (V–VII класи, брудна, дуже брудна та надзвичайно брудна вода) це басейн Південного Бугу. На карті домінують червоні, темно-червоні та чорні маркери, які вказують на високі концентрації забруднюючих речовин. Цей басейн є одним із найбільш вразливих через значне індустріальне навантаження. Басейни Причорномор'я та Приазов'я, де видно значну кількість зон із дуже брудною та надзвичайно брудною водою, зумовлена високим рівнем аграрного забруднення, інтенсивним використанням добрив та недосконалими системами очищення стічних вод. У східній частині України (басейни Дону та східної частини Дніпра) фіксуються численні ділянки із забруд-

ненням у класах VI–VII, що може бути пов'язано з промисловим впливом та високою концентрацією точкових джерел забруднення. Осінній період демонструє початкові ознаки накопичення забруднюючих речовин, які стають більш вираженими у зимовий та межений періоди.

Дискусія. Загалом, аналіз просторового розподілу ЕІЗВ (рис. 2 – 6) дозволяє виявити певні закономірності сезонної та регіональної варіативності. Для періоду зими карта ЕІЗВ демонструють найкращий екологічний стан у більшості басейнів України. Обидва індекси фіксують відносно низькі рівні забруднення, особливо у річках західного регіону (Дунай, Вісла) та частково в басейнах Дніпра. Весняні карти ЕІЗВ показують покращення якості води завдяки збільшенню водності та розведенню забруднюючих речовин. У басейнах Дунаю та Вісли переважають I–II класи якості води. У період межені, низької водності показники забруднення зростають. ЕІЗВ краще диференціює забруднення в окремих річках, демонструючи вищу чутливість до концентрації забруднюючих речовин. Найгірші показники фіксуються в період мілководдя. ЕІЗВ показує більш детальну

просторову варіативність у забрудненні, особливо в басейнах Південного Бугу, Причорномор'я та Приазов'я, де спостерігаються значення VI–VII класів. Восени забруднення залишається високим, проте не досягає пікових значень, характерних для мілководдя. Карти ЕІЗВ для цього періоду демонструють схожі тенденції. Найкращий стан води (I–II класи) спостерігається у західних регіонах (басейни Дунаю та Вісли), де фіксується менший антропогенний вплив. Найбільш проблемні зони – басейни Південного Бугу, Причорномор'я та Приазов'я, які в усі сезони демонструють найвищі значення індексів забруднення. ЕІЗВ є більш чутливим індикатором, оскільки враховує ваговий внесок різних параметрів у загальний рівень забруднення.

На основі аналізу максимальних значень ЕІЗВ для кожного річкового басейну та сезону можна виділити наступні тенденції та найбільш забруднені пости (табл. Е.1). Для басейну Вісли максимальне забруднення в осінь (41.49) і мілководдя (24.98); для Дніпра пікові значення забруднення в мілководдя (75.68) та осінь (58.27); для Дністра високі рівні забруднення в мілководдя (167.57) та зима (66.66); для Дону максимальне забруднення в мілководдя (49.13) та осінь (34.52). Для Дунаю екстремально високе забруднення в осінь (331.45) та мілководдя (49.48); басейн Південного Бугу характеризується високими рівнями забруднення в мілководдя (327.24) та навесні (41.69); річки Приазов'я мають максимальне забруднення в мілководдя (33.35) та восени (34.70); річки Причорномор'я найбільше забруднені восени (94.11) та в мілководдя (30.12).

З таблиці видно, що найвищі значення ЕІЗВ спостерігаються у період мілководдя та осені через зниження водності, що сприяє концентрації забруднень. Найбільш забрудненими є басейни Дністра, Південного Бугу та Дунаю. Найвищі значення ЕІЗВ фіксуються у точках із безпосереднім впливом промислових та сільськогосподарських стоків. Окремі пости спостереження з найвищими рівнями ЕІЗВ вимагають додаткової уваги та можливо подальших заходів для зменшення забруднення.

У зимовий період максимальні значення ЕІЗВ спостерігаються у басейнах Південного Бугу (31.67), Дністра (66.66) та Дніпра (6.29). Найвищі показники характерні для водойм, розташованих поблизу великих промислових і сільськогосподарських об'єктів (наприклад, Ташлицьке водосховище та скидний канал БСА). Найвищі значення ЕІЗВ досягли 7 класу (надзвичайно брудна вода). Забруднення у басейні Дністра є найбільш критичним через скиди поблизу ГЕС та очисних споруд. У весняний період спостерігається зростання ЕІЗВ, пов'язане з підвищенням

концентрації забруднюючих речовин, що потрапляють у річки під час весняного водопілля. Найвищі показники спостерігаються у басейнах Південного Бугу (41.69), Дністра (12.58) та Дніпра (8.51). Значна частина проблемних ділянок знаходиться поблизу промислових регіонів або в місцях скиду стічних вод (наприклад, Домбровський кар'єр у басейні Дністра). У період межені низької водності значення ЕІЗВ зростають через зменшення розведення забруднень у водних об'єктах. Критичними є басейни Дністра (34.21) та Дунаю (24.48), які страждають від впливу великих промислових об'єктів (наприклад, Домбровський кар'єр, скиди у межах Чернівців). Для Дніпра (22.51) і Південного Бугу (13.43) також характерне високе забруднення, зокрема через скиди стічних вод та вплив гідротехнічних споруд. У період мілководдя спостерігається найгірший екологічний стан, що пояснюється найнижчим рівнем водності, який ускладнює самоочищення річок. Максимальні значення ЕІЗВ зафіксовані у басейнах Дністра (167.57), Дніпра (75.67) та Південного Бугу (327.23), що є критичними. Локалізовані джерела забруднення, зокрема скидні канали промислових підприємств і неочищені стоки, відіграють ключову роль. Восени значення ЕІЗВ залишаються високими, особливо в басейнах Південного Бугу (65.03), Дністра (64.13) та Дніпра (58.26). Найвищі показники у Південному Бугу пояснюються впливом Миколаївської ТЕЦ та інших техногенних об'єктів. У Дністрі та Дніпрі значний вплив мають скиди з очисних споруд та промислових зон.

Відповідно до ранжування можна виділити ключові проблемні басейни. Південний Буг з найвищими значеннями ЕІЗВ протягом усього року. Проблемні ділянки включають Миколаївський Бузький лиман, Ташлицьке водосховище та інші райони скидів стічних вод. Значення ЕІЗВ досягають 7 класу в усі сезони, особливо у мілководдя (327.23) та осінь (65.03). Для басейну р. Дністер характерний високий рівень забруднення, особливо у зонах впливу очисних споруд і промислових скидів. Критичні значення зафіксовані у періоди межені (34.21) та мілководдя (167.57). На Дніпрі значний вплив мають скидні канали (наприклад, БСА), технічні водозабори та скиди зворотних вод. У мілководдя та осінь рівень забруднення досягає критичних значень (75.67 і 58.26 відповідно). На Дунаї забруднення спостерігається переважно у межень та мілководдя, де значення досягають 24.48 (оз. Катлабух).

Динаміка ЕІЗВ та відповідних класів води для розглянутих раніше річок Південний Буг, Дністер та Сіверський Донець наведена на графіках (рис. 7 – 12).

Для р. Південний Буг (рис. 7 – 8) значення

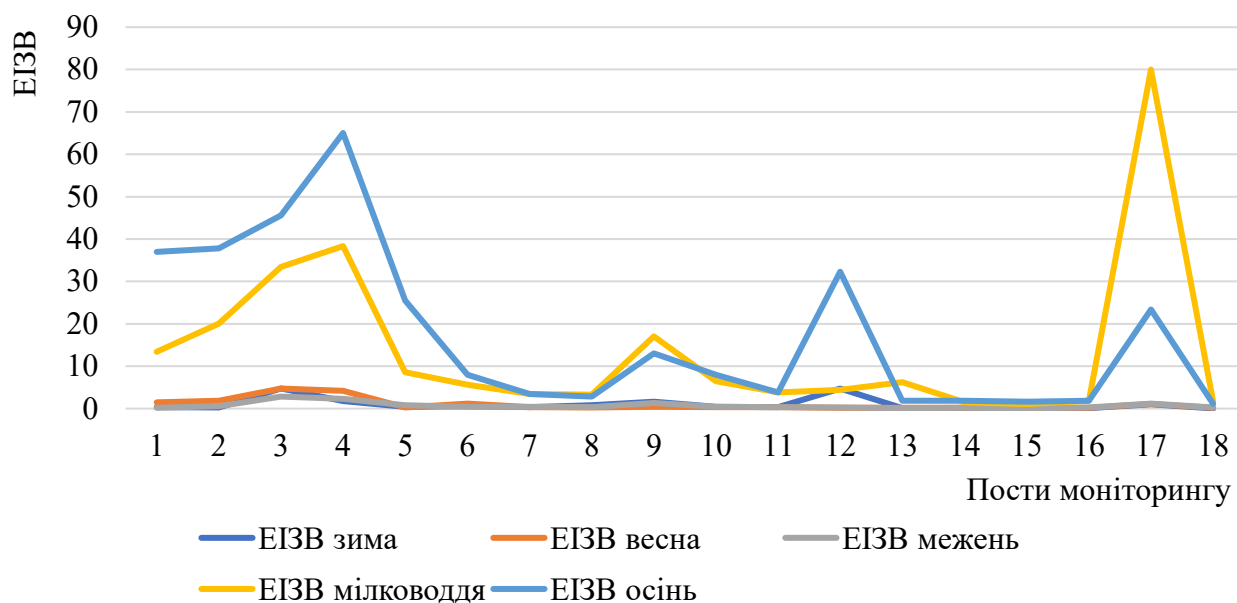


Рис. 7. Динаміка ЕІЗВ за постами моніторингу для річки Південний Буг /
Fig. 7. EWQI dynamics by monitoring stations for the Southern Bug River

ЕІЗВ вказують на змінність якості води протягом різних пор року, з найнижчими середніми значеннями в межень (0.684) та найвищими в осінь (17.443). Стандартне відхилення показує значну варіативність індексу якості води, особливо під час літководдя та в осінній період, що свідчить про значні відмінності між точками вимірювання.

Під час зими та весни спостерігається більш висока частка вимірювань, що належать до кращих класів води (1 та 2 класи). У період межень та літководдя спостерігається зміщення розподілу в бік гірших класів води, з особливо високою часткою вимірювань, що належать до 7 класу води під час літководдя.

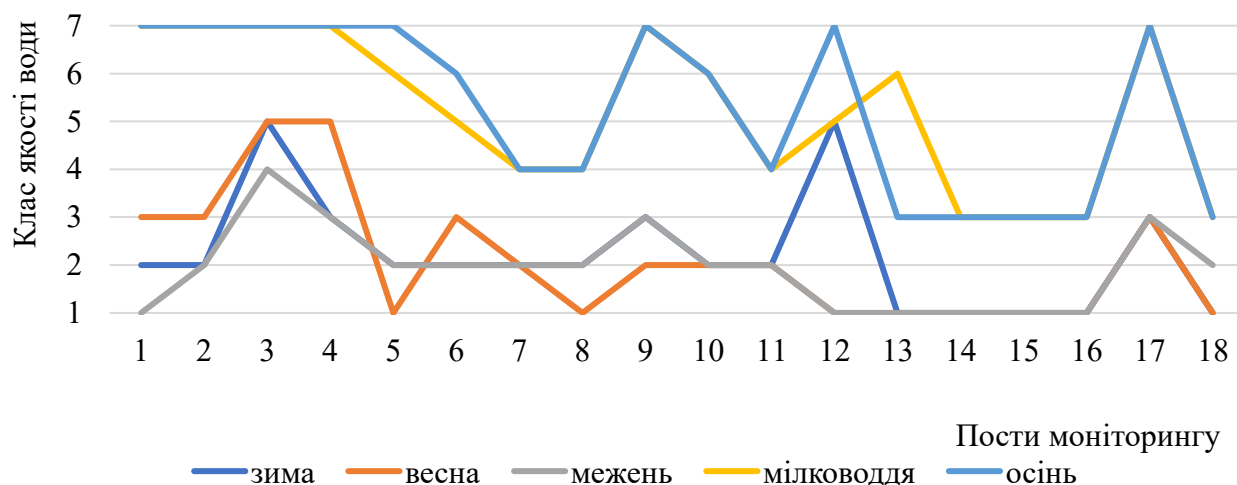


Рис. 8. Динаміка значень класу якості води за постами моніторингу для річки Південний Буг /
Fig. 8. Dynamics of water quality class values by monitoring stations for the Southern Bug River

Осінь характеризується високими значеннями ІЗВ, з більшістю вимірювань, що попадають в 6 та 7 класи води і вказує на значне погіршення якості води. Дані вказують на те, що якість води в річці Південний Буг зазнає значних змін протягом року, з особливим погіршенням під час осіннього періоду, обумовленими сезонними впливами, стоком та аграрною діяльністю.

Значення ЕІЗВ для р. Дністер (рис. 9) свід-

чать про зміну якості води в різні періоди року, з найвищим значенням в зимовий період (4.233). Стандартне відхилення демонструє велику варіативність індексу якості води, особливо в зимовий період, що вказує на значні відмінності в якості води між різними точками вимірювання.

Впродовж зими та весни більшість вимірювань належать до кращих класів води (1 та 2 класи), з найбільшою часткою вимірювань, що

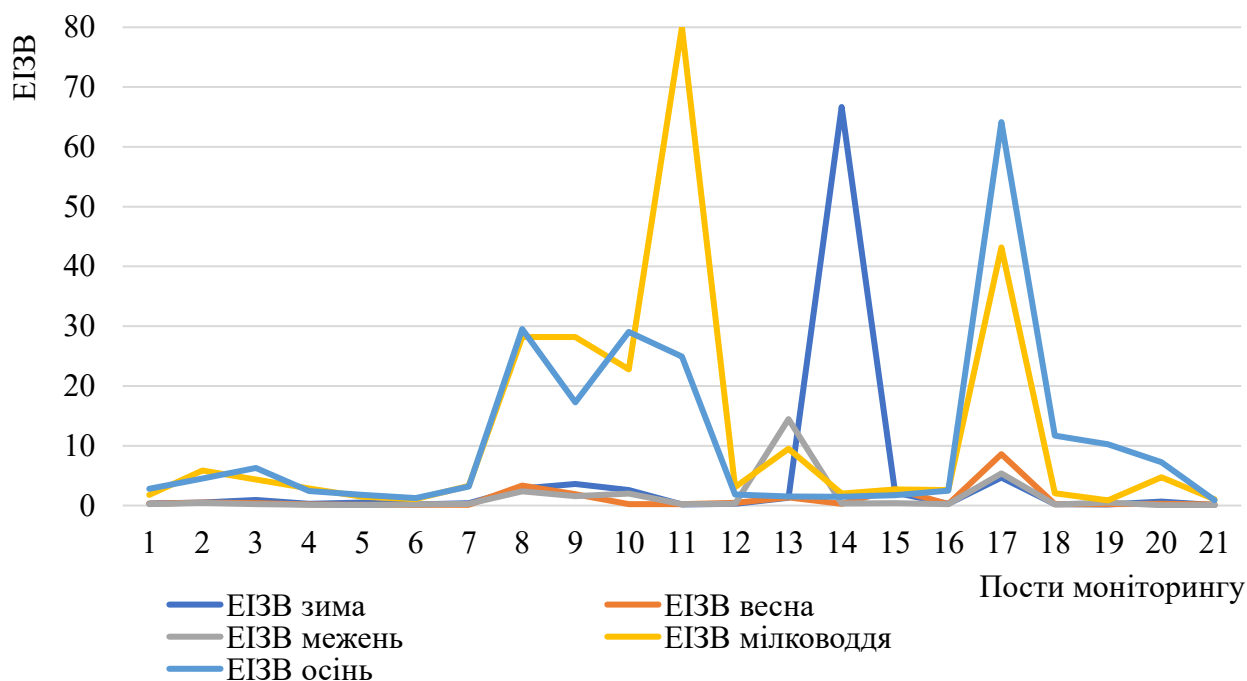


Рис. 9. Динаміка ЕІЗВ за постами моніторингу для річки Дністер /
Fig. 9. EWQI dynamics by monitoring stations for the Dniester River

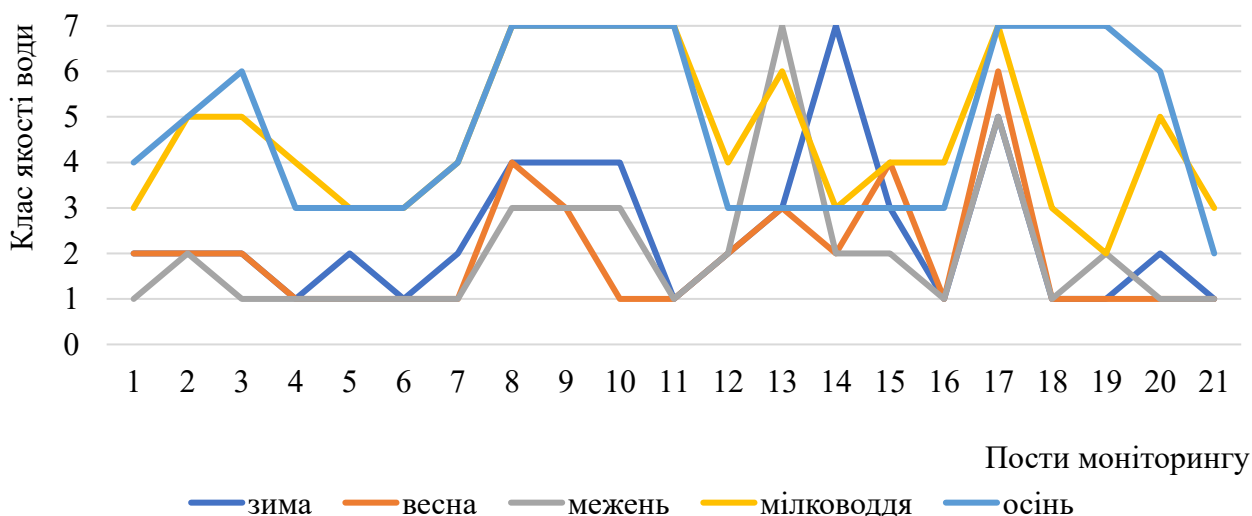


Рис. 10. Динаміка значень класу якості води за постами моніторингу для річки Дністер /
Fig. 10. Dynamics of water quality class values by monitoring stations for the Dniester River

попадають в 1 клас (рис. 10). У період мілководдя та осені спостерігається збільшення частки вимірювань, що належать до гірших класів води (3 клас та вище), з високою часткою вимірювань, що попадають в 3 та 7 класи. Результати свідчать, що річка Дністер також зазнає сезонних змін в якості води, з погіршенням якості під час мілководдя та осіннього періоду. Варто зазначити значну варіативність якості води саме в зимовий період, що пов'язано з особливостями гідрологічного режиму річки та впливом антропогенних факторів.

Середні значення ЕІЗВ для річки Сіверський Донець показують (рис. 11), що найвища середня

якість води спостерігається в зимовий період (0.446) та весною (0.498), з поступовим зниженням в літні місяці (межень - 0.647) та значним погіршенням під час мілководдя (5.940) та осені (6.266). Стандартне відхилення вказує на відносну однорідність якості води в зимовий період та весною, але з більшою варіативністю під час мілководдя та осені.

У зимовий період та весну більшість вимірювань належать до 2 класу, що свідчить про досить високу якість води (рис. 12). Під час мілководдя та осені спостерігається значне погіршення якості води, з більшістю вимірювань, що попадають до

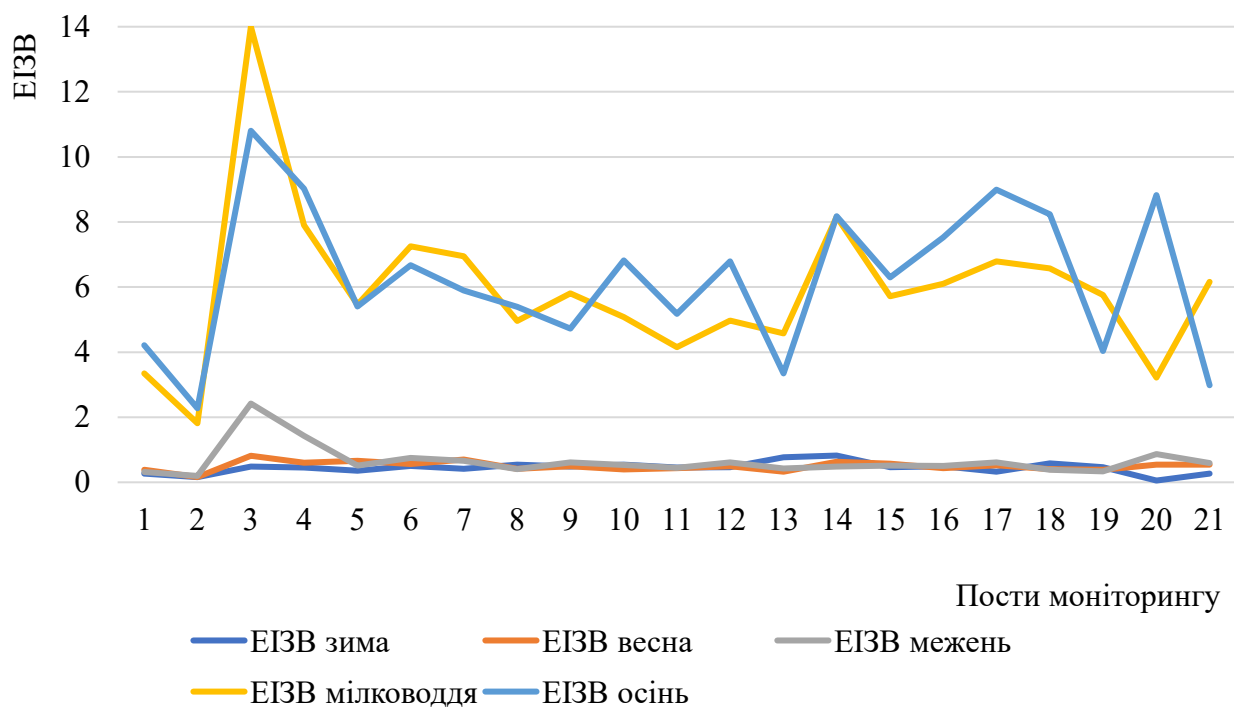


Рис. 11. Динаміка ЕІЗВ за постами моніторингу для річки Сіверський Донець /
Fig. 11. EWQI dynamics by monitoring stations for the Siverskyi Donets River

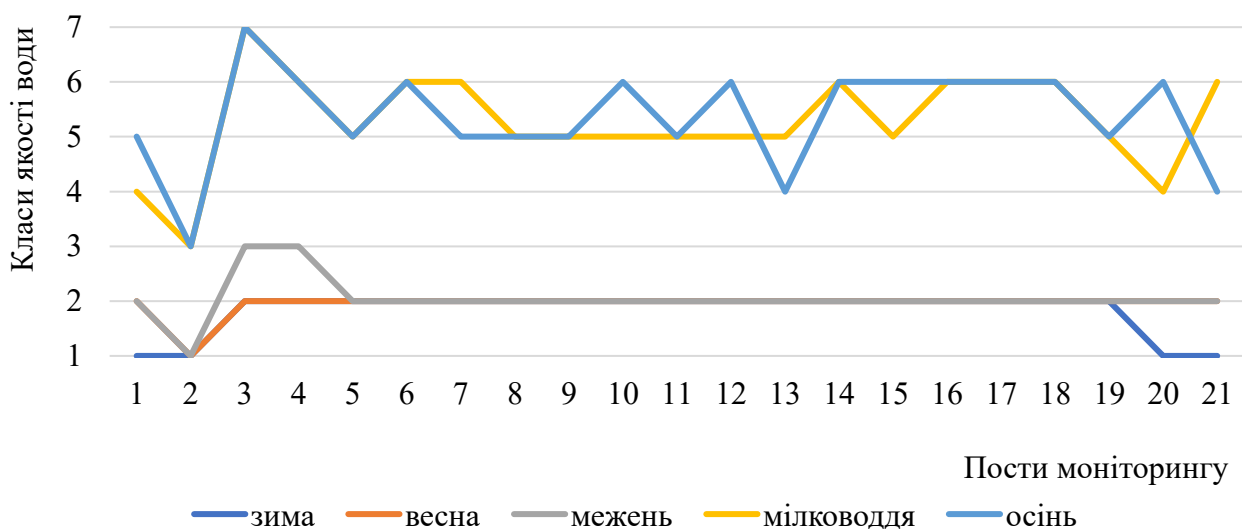


Рис. 12. Динаміка значень класу якості води за постами моніторингу для річки Сіверський Донець /
Fig. 12. Dynamics of water quality class values by monitoring stations for the Siverskyi Donets River

5 та 6 класів.

Результати свідчать про значне сезонне коливання якості води в річці з кращою якістю в холодніші місяці (зима, весна) та погіршенням під час тепліших періодів (мілководдя, осінь). Особливо критичними є періоди мілководдя та осені, коли якість води значно погіршується, що пов'язано з низьким рівнем води, підвищенням температури та антропогенним впливом.

Висновки. Досліджено динаміку ентропійно-зваженого показника забрудненості води для річкових басейнів. Середнє значення ЕІЗВ для весни становить 0.65, що є найнижчим серед

усіх періодів, вказуючи на вищу якість води. Взимку середнє значення зростає до 0.77, що може свідчити про невелике зниження якості води порівняно з весною. В період межені середнє значення ЕІЗВ дещо знижується до 0.71, що все ще вказує на добру якість води. Для мілководдя спостерігається різке збільшення середнього значення до 6.69, що свідчить про значне погіршення якості води. Восени середнє значення зберігається високим і становить 6.89, підтримуючи тенденцію погіршення якості води, зафіксовану в мілководді. Найкращий стан води фіксується у зимовий та весняний періоди, тоді як найбільші

проблеми виникають у період мілководдя. Південний Буг, Причорномор'я та Приазов'я залишаються зонами найбільшого ризику забруднення, що вимагає пріоритетних заходів з моніторингу та покращення якості води. ЕІЗВ забезпечує

більш точний аналіз просторово-часових змін у якості води, є ефективнішим індикатором завдяки своїй чутливості та здатності враховувати багатofакторний вплив.

Список використаних джерел

1. Mahato, M.K., Singh, G., Singh, P.K., Singh, A.K., & Tiwari, A.K. (2017). Assessment of mine water quality using heavy metal pollution index in a coal mining area of Damodar River Basin, India. *Bull Environ Contam Toxicol*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2097-3>
2. Pandey, H.K., Tiwari, V., Kumar, S., Yadav, A., & Srivastava, S.K. (2020). Groundwater quality assessment of Allahabad smart city using GIS and water quality index. *Sustain Water Resour Manag*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00375-x>
3. Sajil Kumar, P.J., & James, E.J. (2013). Development of Water Quality Index (WQI) model for the groundwater in Tirupur district, South India. *Chin J Geochem* 32:261–268. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11631-013-0631-5>
4. Shweta, T., Bhavtosh, S., Prashant, S., & Rajendra, D. (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. *Am J Resour*. DOI: <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>
5. Sutadian, A.D., Muttill, N., Yilmaz, A.G., & Perera, B.J.C. (2018) Development of a water quality index for rivers in West Java Province, Indonesia. *Ecol Indic*, 85:966–982 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.049>
6. Sutadian, A.D., Muttill, N., Yilmaz, A.G., & Perera, B.J.C. (2016). Development of river water quality indices – a review. *Environ Monit Assess*, 188(1):58 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0>
7. Amiri, V., Rezaei, M., & Sohrabi, N. (2014). Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI) in Lenjanat. *Iran Environ Earth Sci*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3255-0>
8. Mrunmayee, M., Sahoo, K.C., Patra, J.B., Swain & K.K. Khatua (2017) Evaluation of water quality with application of Bayes' rule and entropy weight method, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21:6, 730-752, DOI: <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1150895>
9. Singh, K.R., Goswami, A.P., Kalamdhad, A.S., & Kumar, B. (2019) Development of irrigation water quality index incorporating information entropy. *Environ Dev Sustain* 22:3119–3132. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00338-z>
10. Muangthong, S., & Shrestha, S. (2015). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: case study of the Nampong River and Songkhram River, Thailand. *Environ Monit Assess*, 187(9):548. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4774-1>
11. Kadam, A.K., Wagh, V.M., Muley, A.A., Umrikar, B.N., & Sankhua, R.N. (2019). Prediction of water quality index using artificial neural network and multiple linear regression modelling approach in Shivganga River basin, India. *Model Earth Syst Environ* 5:951–962. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00581-3>
12. Li, P., Qian, H., & Wu, J. (2010). Groundwater quality assessment based on improved water quality index in Pengyang County, Ningxia, Northwest China. *J Chem*, 7(S1): S209–S216. DOI: <https://doi.org/10.1155/2010/451304>
13. Ashby, W. (1959). *Introduction to cybernetics*. M.: IL. 432 p. DOI: <https://doi.org/10.1080/00048405785200161>
14. Amiri, V., Rezaei, M., & Sohrabi, N. (2014). Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI) in Lenjanat, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 72(9), 3479–3490. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3255-0>
15. Subba Rao, N., Sunitha, B., Adimalla, N., & Chaudhary, M. (2020). Quality criteria for groundwater use in Telangana state, India, through ISD, EWQI and PCA. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(2), 579–599. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00393-5>
16. Abdus-Salam, M.O., Akinsanya, Y.O., Salami, I.O. et al. (2024). Entropy-weighted water quality index assessment of groundwater in Ibadan metropolis, Southwestern Nigeria. *Discov Water* 4, 121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00157-y>
17. Mashala, M. J., Dube, T., & Ayisi, K. K. (2025). Seasonal and Spatial Dynamics of Surface Water Resources in the Tropical Semi-Arid Area of the Letaba Catchment: Insights from Google Earth Engine, Landscape Metrics, and Sentinel-2 Imagery. *Hydrology*, 12(4), 68. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology12040068>
18. Li, P., Karunanidhi, D., Subramani, T. et al. (2021). Sources and Consequences of Groundwater Contamination. *Arch Environ Contam Toxicol* 80, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00805-z>
19. Gorgij, A.D., Kisi, O., Moghaddam, A.A. et al. (2017). Groundwater quality ranking for drinking purposes, using the entropy method and the spatial autocorrelation index. *Environ Earth Sci* 76, 269 DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6589-6>
20. Islam, A. R. M. T., Mamun, A. A., Rahman, M. M., & Zahid, A. (2020). Simultaneous comparison of modified-integrated water quality and entropy weighted indices: Implication for safe drinking water in the coastal region of Bangladesh. *Ecological Indicators*, 113, 106229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106229>
21. Adimalla, N. (2021). Application of the Entropy Weighted Water Quality Index (EWQI) and the Pollution Index of Groundwater (PIG) to Assess Groundwater Quality for Drinking Purposes: A Case Study in a Rural Area of Telangana State, India. *Arch Environ Contam Toxicol* 80, 31–40. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00800-4>
22. Egbueri, J. C., Ameh, P. D., & Unigwe, C. O. (2020). Integrating entropy-weighted water quality index and multiple pollution indices towards a better understanding of drinking water quality in Ojoto area, SE Nigeria. *Scientific African*, 10, e00644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00644>

23. Adimalla, N., Li, P. & Venkatayogi, S. (2018). Hydrogeochemical Evaluation of Groundwater Quality for Drinking and Irrigation Purposes and Integrated Interpretation with Water Quality Index Studies. *Environ. Process.* 5, 363–383. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-018-0297-4>
24. Ganiyu, S.A., Oyadeyi, A.T., Rabi, J.A. et al. (2022). Hydrogeochemical categorization and quality assessment of shallow groundwater sources in typical urban slum and peri-urban areas of Ibadan, Southwest Nigeria. *Environ Earth Sci* 81, 111. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10237-8>
25. Oyelakin, J.F., Ahmad, S.M., Aiyelokun, O.O. et al. (2021). Water quality assessment of groundwater in selected potable water sources for household use in Ibadan, Southwest, Nigeria. *Int J Energ Water Res* 5, 125–132. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42108-020-00090-5>
26. Mama, A.C., Bodo, W.K.A., Ghepdeu, G.F.Y., Ajonina, G.N. and Ndam, J.R.N. (2021). Understanding Seasonal and Spatial Variation of Water Quality Parameters in Mangrove Estuary of the Nyong River Using Multivariate Analysis (Cameroon Southern Atlantic Coast). *Open Journal of Marine Science*, 11, 103–128. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojms.2021.113008>
27. Umwali, E.D., Kurban, A., Isabwe, A. et al. (2021). Spatio-seasonal variation of water quality influenced by land use and land cover in Lake Muhazi. *Sci Rep* 11, 17376. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96633-9>
28. Ubuoh, E.A., Nwogu, F.U., Ossai-Abeh, E. et al. (2024). Evaluation of hydro-chemical facies and surface water quality dynamics using multivariate statistical approaches in Southern Nigeria. *Sci Rep* 14, 31600. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77534-z>
29. Zhang, J., Hao, Z., Liu, X., Wang, B., Guo, W., & Yan, J. (2024). Surface Water Quality Evaluation and Pollution Source Analysis at the Confluence of the Wei River and Yellow River, China. *Water*, 16(14), 2035. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16142035>
30. Piddubna, L., Dybach, I., Krasovskiy, V., Pliekhanov, K., Mogylevskiy, R. (2024). Analysis of the impact of digital development on a country's economic growth. *Economic Development*, 23, 38–46. DOI: <https://doi.org/10.57111/econ/2.2024.38>
31. Teslenko, A., Chernukha, A., Bezuglov, O., Bogatov, O., Kunitsa, E., Kalyna, V., Katunin, A., Kobzin, V., Minka, S. (2019). Construction of an algorithm for building regions of questionable decisions for devices containing gases in a linear multidimensional space of hazardous factors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 42–54. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181668>
32. Malyarets, L., Iastremska, O., Barannik, I., Larina, K. (2024). Assessment of structural changes in stable development of the country. *Economic Development*, 23, 8–16. DOI: <https://doi.org/10.57111/econ/2.2024.08>
33. Gavkalova, N., Kyrychenko, Y. (2023). Scientific-theoretical basis of the territorial development strategy. *Economic Development*, 22, 31–37. DOI: <https://doi.org/10.57111/econ/1.2023.31>
34. Guryanova, L., Yatsenko, R., Dubrovina, N., Babenko, V., Gvozdzitskiy, V. (2021). Machine learning methods and models, predictive analytics and applications: Development trends in the post-crisis syndrome caused by COVID-19. *Proceedings of MPSESM-XIII Conference*. <https://ceur-ws.org/Vol-2649/paper1.pdf>
35. Bezsonnyi, V., Plyatsuk, L., Ponomarenko, R., Asotskiy, V., Tretyakov, O., Zhuravskij, M. (2023). Integrated assessment of the surface source of water supply according to environmental-risk indicators. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 32(3), 461–473. DOI: <https://doi.org/10.15421/112341>
36. Bezsonnyi, V., Nekos, A. (2022). Modeling of the oxygen regime of the Chervonooskylsky reservoir. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2022*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580216>
37. Bezsonnyi, V., Tretyakov, O., Sherstyuk, M., Nekos, A. (2022). Thermodynamic aspects of the systems approach in ecology. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series 'Geology. Geography. Ecology'*, (57), 268–281. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-20>
38. Bezsonnyi, V. (2023). Use of the entropy approach in water resource monitoring systems. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series 'Geology. Geography. Ecology'*, (58), 302–320. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-23>
39. Bezsonnyi, V., Nekos, A. (2023). Analysis of the environmental risk of water bodies in conditions of military danger. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2023*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520153>
40. Bezsonnyi, V., Plyatsuk, L., Ponomarenko, R., Tretyakov, O. (2023). Assessment of ecological safety of a surface water object. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2023*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520155>
41. Bezsonnyi, V. (2022). Assessment of environmental risks from the impact of domestic and industrial effluents. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2022*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580218>
42. Bezsonnyi, V., Plyatsuk, L., Zhuravskij, M., Tretyakov, O., Ponomarenko, R. (2023). Integrated assessment of the Dnipro Reservoir pollution sources. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 32(3), 461–473. DOI: <https://doi.org/10.15421/112341>
43. Bezsonnyi, V., Ponomarenko, R., Tretyakov, O., Asotskiy, V., & Kalynovskiy, A. (2021). Regarding the choice of composite indicators of ecological safety of water in the basin of the Siverskyi Donets. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30(4), 622–631. DOI: <https://doi.org/10.15421/112157>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Seasonal and spatial dynamics of entropy-weighted water quality assessment in surface waters of Ukraine

Vitalii Bezsonnyi¹

PhD (Technical), Associate Professor,

Department of Hotel, Restaurant Business and Craft Technologies,

¹ Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine;

Oleg Tretyakov²

DSc (Technical), Professor,

Department of Civil and Industrial Safety named after Hero of Ukraine Chub O.S.,

² Kyiv Aviation Institute, Kyiv, Ukraine;

Leonid Plyatsuk³

DSc (Technical), Professor,

Head of the Department of Ecology and Environmental Protection Technologies,

³ Sumy State University, Sumy, Ukraine;

Roman Ponomarenko⁴

DSc (Technical), Professor,

Acting Head of the Research Institute for Civil Protection,

⁴ National University of Civil Protection of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

Oksana Davydova¹

DSc (Economics), Professor,

Head of the Department of Hotel, Restaurant Business and Craft Technologies

ABSTRACT

Introduction. Ensuring the ecological safety of river basins is one of the most urgent environmental challenges in the context of achieving the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 6 (Clean Water and Sanitation) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production). Surface water quality is a critical component of regional environmental stability and sustainable development. However, increasing anthropogenic pressure and climate change are destabilizing natural aquatic ecosystems and complicating the functioning of water supply systems. According to international data, over 40% of the global population faces water scarcity.

This study aims to assess the seasonal and spatial variability in the quality of surface waters in Ukraine using an entropy-weighted water quality index (EWQI). The object of the research is the system of surface water bodies of Ukraine, while the subject is the seasonal and spatial variation in their ecological status based on physical and chemical indicators.

Methods. The study utilized open-access data from Ukraine's state environmental monitoring system, covering over 540 monitoring points across major river basins: the Dnipro, Dniester, Danube, Don, Vistula, Southern Bug, Azov Sea rivers, and the Black Sea coastal basins. Water quality data were analyzed for five seasonal periods: winter, spring, low-flow, shallow-water, and autumn. Ten key hydrochemical parameters were selected for analysis, including dissolved oxygen, biological oxygen demand, chemical oxygen demand, ammonium nitrogen, nitrates, phosphates, total hardness, and total dissolved solids.

The EWQI was calculated by normalizing each parameter and assigning it a weight based on its Shannon entropy. The greater the variability of a parameter, the higher its informational contribution. The final index was classified according to a seven-class scale, from "very clean" to "extremely polluted". Spatial analysis and visualizations were carried out using QGIS.

Results. The entropy-weighted assessment revealed clear seasonal and regional trends in surface water quality. The best water quality was recorded during the winter and spring periods, while the highest levels of pollution occurred in shallow-water and autumn seasons. This dynamic is attributed to temperature fluctuations, reduced dilution capacity during low flows, and agricultural runoff during warm periods. Spatially, the most polluted regions were identified in the basins of the Southern Bug, Azov Sea rivers, and the Black Sea littoral, where anthropogenic pressures are particularly high. EWQI values also indicated that certain tributaries and local watercourses demonstrated extreme sensitivity to seasonal factors. The integration of entropy-based weights enhanced the sensitivity of the water quality index to both spatial variability and seasonal trends, providing a more differentiated ecological picture than conventional methods.

Conclusions. The entropy-weighted water quality index provides a robust, objective, and adaptable tool for assessing the ecological status of surface waters. The method successfully captures seasonal and spatial variability, highlighting critical regions and periods that require intensified environmental monitoring and remediation measures. The research findings can serve as a scientific basis for updating national water monitoring programs and aligning with international environmental standards.

Keywords: *entropy-weighted water quality index (EWQI); surface water; ecological monitoring; seasonal variation; spatial analysis.*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 1 April 2025

Accepted 2 May 2025