

## Аналіз формування профілів фізико-хімічних показників скиду в контексті дотримання екологічної якості річки-реципієнта

**Микола Клименко**<sup>1</sup>

д. с.-г. н., професор, завідувач кафедри екології,

технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства,

<sup>1</sup> Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна,

e-mail: [m.o.klimenko@nuwm.edu.ua](mailto:m.o.klimenko@nuwm.edu.ua),  <https://orcid.org/0000-0003-0892-0648>;

**Людмила Романчук**<sup>2</sup>

д. с.-г. н., професор, кафедра екології та природоохоронних технологій,

<sup>2</sup> Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна,

e-mail: [ludmilaromanchuck14@gmail.com](mailto:ludmilaromanchuck14@gmail.com),  <https://orcid.org/0000-0003-4790-8414>;

**Ольга Бедункова**<sup>1</sup>

д. біол. н., професор, кафедра екології,

технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства,

e-mail: [o.o.biedunkova@nuwm.edu.ua](mailto:o.o.biedunkova@nuwm.edu.ua),  <https://orcid.org/0000-0003-4356-4124>;

**Наталія Вознюк**<sup>1</sup>

к. с.-г. н., професор, кафедра екології,

технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства,

e-mail: [n.m.voznyuk@nuwm.edu.ua](mailto:n.m.voznyuk@nuwm.edu.ua),  <https://orcid.org/0000-0001-9947-4027>;

**Олена Ліхо**<sup>1</sup>

к. с.-г. н., доцент, професор кафедри екології,

технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства,

e-mail: [o.a.liho@nuwm.edu.ua](mailto:o.a.liho@nuwm.edu.ua),  <https://orcid.org/0000-0001-5991-5035>

Скиди зворотних вод оборотних систем охолодження атомних електростанцій можуть змінювати фізико-хімічний стан річок-реципієнтів і впливати на екологічну стабільність водотоків. У роботі проведено щотижневий моніторинг якості додаткової, зворотної охолоджуючої води Рівненської АЕС та води річки Стир до та після скиду зворотної води упродовж 2023 року з метою оцінки впливу техногенного навантаження. Досліджено 17 фізико-хімічних показників, порівняних із експлуатаційними нормами, допустимими концентраціями та екологічними нормативами ГДК. Визначено фонові концентрації до зони впливу РАЕС, що дозволило розмежувати природну та антропогенну складові варіації. Для статистичної обробки даних застосовано методи аналізу головних компонент (РСА), кореляційний, кластерний та регресійний аналіз. З'ясовано, що всі показники якості зворотної води перебувають у межах нормативних значень, а показники якості води річки Стир на ділянках до та після скиду зворотної води РАЕС демонструють загальну відповідність більшості параметрів екологічним нормативам. Водночас зафіксовано випадки перевищення: рівень рН досягав 8,66 од., що перевищує верхню межу нормативу 8,5 од.; значення ХСК сягало 83,2 мгО/дм<sup>3</sup> при ГДК 50 мгО/дм<sup>3</sup>; концентрація РО<sub>4</sub><sup>3-</sup> до 0,798 мг/дм<sup>3</sup> (ГДК 0,7 мг/дм<sup>3</sup>); N-NH<sub>3</sub> до 2,13 мг/дм<sup>3</sup> (ГДК 0,5 мг/дм<sup>3</sup>); БСК<sub>5</sub> до 3,87 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> (ГДК 3,0 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>). Такі перевищення свідчать про періодичні проблеми з органічним і трофічним навантаженням. Показано, що перші три головні компоненти пояснюють 66,9% варіацій, основними чинниками яких є температура та іонний склад (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>). Найбільш значний вплив скидів на якість води річки Стир спостерігається для сульфат-, нітрат- та амоній-іонів (R<sup>2</sup> > 0,7), тоді як інші показники перебувають у межах природного фону. За інтегральними індексами (IC = 1,25; ITC = 3,25; OPI = 0,15; EI = 0,08; NPI = 1,56) якість води річки оцінено як добру, без ознак евтрофікації та з низьким рівнем органічного навантаження. Отримані результати підтверджують відносно стабільний екологічний стан річки Стир і підкреслюють необхідність систематичного профілактичного моніторингу з урахуванням фонових умов.

**Ключові слова:** екологічна безпека, водний скид, зворотна вода, регресійні залежності, аналіз головних компонентів, кластерний аналіз, індекси якості води, показники якості води, екологічні нормативи.

**Як цитувати:** Клименко Микола, Романчук Людмила, Бедункова Ольга, Вознюк Наталія, Ліхо Олена (2025). Аналіз формування профілів фізико-хімічних показників скиду в контексті дотримання екологічної якості річки-реципієнта. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 566-579. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-42>

**In cites:** Klymenko Mykola, Romanchuk Lyudmyla, Biedunkova Olha, Voznyuk Nataliia, Olena Likho (2025). An analysis of the formation of profiles of physical and chemical indicators discharge in the context of compliance with the environmental quality of the recipient river. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 566-579. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-42> [in Ukrainian]

**Вступ.** Вода є критичним ресурсом у функціонуванні атомних електростанцій (АЕС), зокрема в оборотних системах охолодження (ОСО), які забезпечують ефективне відведення тепла та

стабільність технологічних процесів [1, 2]. У процесі експлуатації ОСО формується зворотна вода, що скидається у природні водні об'єкти [3]. Такий скид містить концентровані компоненти

сольового складу, біогенні та органічні речовини, які можуть змінювати гідрохімічний режим річок-приймачів [4-6]. Поряд із точковим впливом водоскидів електростанцій, на якість поверхневих вод діє багатofакторне навантаження, включаючи сільськогосподарські стоки, міські каналізаційні системи, атмосферні випадіння та кліматичні коливання, що ускладнює відокремлення технологічного внеску від природних чи дифузних джерел. Відповідними документами що регулюють вплив водних скидів на навколишнє середовище є Водний кодекс України (ВКУ) [7] та Водна рамкова директива (ВДР) [8]. Екологічний стандарт якості води регламентується ВРД та визначається для окремої забруднюючої речовини. ВКУ встановлює аналог екологічного стандарту якості - гранично допустиму концентрацію (ГДК) речовини у воді, за якої визначається придатність води для конкретних цілей водокористування. Обмеження скиду речовин з урахуванням їх складу і властивостей здійснюється шляхом встановлення гранично допустимого скиду забруднюючих речовин зі зворотними водами, що з екологічних позицій є максимально допустимою нормою для водного об'єкта [9, 10]. Для кожної забруднюючої речовини, скидання якої нормується, за умовами дозволу на спеціальне водне користування встановлюється допустимі концентрації в зворотній воді [11].

**Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми.** Традиційний екологічний контроль фізико-хімічних показників якості ґрунтується на порівнянні вимірних показників із нормативними значеннями (експлуатаційними нормами, допустимими концентраціями, та ГДК). Проте такий підхід часто не дозволяє комплексно оцінити взаємозв'язки між показниками, визначити провідні фактори їх варіацій та простежити багатовимірні закономірності формування якості води. З огляду на складність природних і антропогенних процесів, що впливають на гідросферу, застосування сучасних статистичних методів (кореляційного аналізу, аналізу головних компонент (РСА), кластеризації, регресійного аналізу) є необхідним для системного вивчення просторово-часових закономірностей та інтегральної оцінки стану водних об'єктів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю наукового обґрунтування екологічної безпеки водних об'єктів при впливі водних скидів атомних електростанцій. В умовах зростання техногенного навантаження важливо не лише контролювати відповідність фізико-хімічних показників нормативам, але й кількісно оцінювати внесок зворотних вод у формування якості річкових екосистем. Це дозволяє забезпечити не лише констатувати відповідність чи перевищення ГДК, але й з'ясу-

вати природу варіацій, ступінь технологічного внеску та роль природних процесів у формуванні якості води, що має безпосереднє значення для забезпечення екологічної безпеки та сталого використання водних ресурсів. Наукова новизна роботи полягає у поєднанні класичного нормативного підходу з багатовимірними статистичними методами (РСА, кластерний, регресійний аналіз) для визначення ключових чинників варіацій та кількісної оцінки технологічного внеску скидів у якість річки Стир.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є комплексна оцінка формування та варіацій фізико-хімічних показників якості технологічних та природних вод при скидів зворотної води Рівненської АЕС (РАЕС) із застосуванням багатofакторних статистичних методів для визначення ключових факторів змін та забезпечення відповідності екологічним нормативам.

Завданнями дослідження є:

1. Провести моніторинг фізико-хімічних показників додаткової, зворотної охолоджуючої води РАЕС та води річки Стир упродовж 2023 року;
2. Порівняти отримані результати з експлуатаційними нормами, допустимими концентраціями та екологічними ГДК;
3. Застосувати метод РСА для виявлення провідних факторів варіації та групування змінних;
4. Виконати кореляційний аналіз для встановлення взаємозв'язків між основними показниками якості вод;
5. Виконати кластерний аналіз (КА) для класифікації фізико-хімічних показників за їх поведінкою при переході від технологічних до річкових вод та прослідити вплив скиду зворотної води на формування концентрацій у річці Стир за допомогою регресійних залежностей;
6. Визначити фонові концентрації основних фізико-хімічних показників у річці Стир до зони впливу скиду зворотної води РАЕС для використання у порівняльному аналізі;
7. Визначити категорії якості води річки Стир за інтегральними індексами якості води;
8. Надати науково обґрунтовані висновки щодо екологічної безпеки та необхідності моніторингу скидів зворотної води.

**Методи і методики проведення дослідження.** Об'єктом дослідження є технологічні води ОСО РАЕС, що використовуються у виробничих процесах електростанції, а також поверхневі води річки Стир на до та ОСО. Предметом дослідження є фізико-хімічні показники якості додаткової та зворотної охолоджуючої води ОСО РАЕС та їхній вплив на екологічний стан річки

Стир. РАЕС експлуатує чотири енергоблоки типу ВВЕР загальною потужністю 2835 МВт. Забір та скид води здійснюється з річки Стир, яка є притокою р. Прип'ять, має довжину 494 км та площу басейну 13 100 км<sup>2</sup> [12]. Водопідготовка додаткової води здійснюється на очисних спорудах і включає освітлення шляхом вапнування, стабілізаційну обробку сірчаною кислотою та використання оксіетилідендифосфонової кислоти [13]. Підготовлена додаткова вода подається до ОСО, використовується для охолодження конденсаторів турбін та іншого обладнання, після чого у вигляді зворотної води без попереднього очищення відводиться до річки Стир.

Відбір проб і програма моніторингу включала виконання щотижневих вимірювань 17 фізико-хімічних показників рН, температура води (Т), сухий залишок (СЗ), загальна лужність (ЗЛ) та твердість (ЗТ), концентрація хлорид-іонів (Cl<sup>-</sup>), сульфат-іонів (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), фосфат-іонів (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), іонів натрію (Na<sup>+</sup>) та калію (K<sup>+</sup>), нітрат- (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) та нітрит (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) - іонів, азоту амонійного (N-NH<sub>3</sub>), завислих речовин (ЗР), розчиненого кисню (РК), хімічного споживання кисню (ХСК), біохімічного споживання кисню за 5 діб (БСК<sub>5</sub>). Вимірювання фізико-хімічних показників якості води здійснювали за стандартними методиками. Т визначали за допомогою термометра, рН вимірювали електрохімічним методом із застосуванням рН-метра. ЗЛ та ЗТ визначали титриметричними методами, концентрацію Cl<sup>-</sup> та SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> встановлювали осаджуванням методом з використанням розчинів солей срібла та барію відповідно. Вміст РК визначали методом Вінклера, ХСК – перманганатометричним методом, а БСК<sub>5</sub> – йодометричним методом. Концентрацію Na<sup>+</sup> та K<sup>+</sup> визначали методом полум'яної фотометрії, тоді як N-NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> та PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> встановлювали фотометричним методом. ЗР визначали гравіметричним методом, а СЗ – після випарювання проби з подальшим висушуванням залишку. Відбір проб та вимірювання фізико-хімічних показників здійснювалися вимірювальною лабораторією РАЕС (свідоцтва про визнання вимірювальних можливостей №R-8/8-48-6 від 02.11.23 р. чинне до 02.11.28 р., № R-8/8-48-6/1 від 22.01.2024 р. чинне до 02.11.2028 р.), з використанням вимірювальних приладів, які пройшли перевірку в сфері Державного метрологічного нагляду України. Отримано дозвіл РАЕС на публікацію даних контролю у відкритих джерелах (Акт Рівненської АЕС № 036-08 –А-Заг.В від 02.03.2023 р.). Порівняння отриманих результатів проводили з експлуатаційними нормами для додаткової води [14], допустимими концентраціями для зворотної води [11] та екологічними нормативами ГДК для річкової води [15-17], що

наведені у таблиці 1. Більш того, було проаналізована динаміка змін концентрацій фізико-хімічних показників контрольної ділянки річки Стир до скиду зворотної води РАЕС як фонові. Це дозволило оцінити природний рівень фізико-хімічних показників і порівняти його з умовами після скиду. Для оцінки якості води застосовували індекс сольового складу (ІС) та індекс трофосапробіологічного стану (ІТС) [18,19]. Крім того, були використані індекси якості: Nutrient Pollution Index (NPI) для оцінки забруднення біогенними елементами [20], Eutrophication Index (EI) для визначення трофічного статусу [21] та Organic Pollution Index (OPI) для оцінки органічного навантаження [22].

Статистична обробка результатів вимірювань включала визначення мінімуму - максимуму (min-max), середнього арифметичного значення (М), стандартного відхилення ( $\pm$ SD). Крім того проведений кореляційний аналіз з розрахунком коефіцієнтів Пірсона (r), КА профілів концентрацій «додаткова – зворотна – річкова вода», а також аналіз головних компонент (РСА) для виявлення головних факторів варіацій. Кореляційний аналіз, КА та РСА проводили відповідно рекомендацій [23]. Силу лінійного зв'язку між змінними визначали за значенням r, з наступною градацією: в діапазоні  $0,1 \leq r \leq 0,1$  – зв'язок між змінними дуже слабкий або відсутній; r у діапазоні від 0,3 до 0,5 або від -0,3 до -0,5 – помірна позитивна або негативна кореляція відповідно; r у діапазоні від 0,5 до 0,7 або від -0,5 до -0,7 – середня позитивна або негативна кореляція відповідно; r у діапазоні від 0,7 до 1,0 або від -0,7 до -1,0 – сильна позитивна або негативна кореляція відповідно. КА був застосована до профілів концентрацій кожного параметра в додатковій, зворотній та води річки Стир, для цього кожний параметр було нормалізовано по профілю за відносним підвищенням або зниженням значення серед «додаткової - зворотної - річкової» вод. Вплив зворотної води на формування концентрацій у річці оцінювали за допомогою регресійних моделей із розрахунком коефіцієнта детермінації (R<sup>2</sup>), що дозволяло кількісно визначити частку поясненої дисперсії фізико-хімічних показників. Для трактування значень R<sup>2</sup> використовували наступну градацію: значення R<sup>2</sup> > 0,7 свідчать про суттєвий вплив скидів на річкові концентрації; значення R<sup>2</sup> = 0,3–0,7 означають частковий, але статистично помітний зв'язок; значення R<sup>2</sup> < 0,3 вказують, що роль зворотної води у формуванні річкових концентрацій для цього показника обмежена, і основний внесок ймовірно здійснюють інші джерела чи процеси. Усі розрахунки виконували з використанням програмного пакета JASP v.0.14.3.

Екологічні нормативи та експлуатаційні значення фізико-хімічних показників якості /  
Environmental standards and operational values of quality physical and chemical indicators

Параметр	Експлуатаційна норма для додаткової води ОСО [14]	Допустима концентрація в зворотній воді [11]	ГДК води р. Стир
pH, од.	6,0 - 10,3	6,5 - 9,0	6,5 - 8,5 [17]
T, °C	не нормується	збільшення не більше 3	не більше 28
СЗ, мг/дм <sup>3</sup>	не більше 415	не більше 1000	не більше 1000 [17]
ЗЛ, мг-екв/дм <sup>3</sup>	не більше 2,5	не нормується	0,5 - 6,5
Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	не більше 50	не більше 122,5	не більше 300 [17]
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	не більше 100	не більше 418,2	не більше 100 [17]
ЗТ, мг-екв/дм <sup>3</sup>	не більше 4,0	не нормується	1,5-7,0 [16]
ХСК, мгО/дм <sup>3</sup>	не нормується	не більше 80,62	не більше 50 [15]
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	не більше 1,0	не більше 0,7	не більше 0,7 [15]
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	не більше 15	не більше 22	не більше 45 [17]
ЗР, мг/дм <sup>3</sup>	не більше 10	не більше 14,88	не більше 25 [15]
Na <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	не нормується	не нормується	не більше 10 [16]
K <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	не нормується	не нормується	не більше 120 [16]
N-NH <sub>3</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	не нормується	не більше 0,835	не більше 0,5 [15]
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	не більше 5,0	не більше 0,10	не більше 3,3 [17]
РК, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	не нормується	більше 4,0	більше 4,0 [17]
БСК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	не нормується	не більше 3,0	не більше 3,0 [15, 17]

**Результати дослідження. Фізико-хімічні показники додаткової, зворотної води ОСО та води річки Стир.** Показники якості додаткової води ОСО за 2023 рік демонструють певну варіативність (рис. 1а). Загалом якість додаткової води ОСО за більшістю значень фізико-хімічних показників контролю відповідає експлуатаційним нормам (табл. 1). ЗТ варіювалася в межах 1,5–4,32 мг-екв/дм<sup>3</sup> із середнім значенням (M=2,23 мг-екв/дм<sup>3</sup>), хоча мінімальні та середні значення відповідають нормам, максимальне значення перевищує допустимий рівень. Концентрація ЗР становила 10,42–35,78 мг/дм<sup>3</sup> із середнім значенням (M=26,54 мг/дм<sup>3</sup>), що перевищує допустимий рівень. Для інших фізико-хімічних показників відхилення значень від експлуатаційної норми для додаткової води ОСО не фіксувалось.

Дослідження фізико-хімічних показників якості зворотної води ОСО за 2023 рік демонструє стабільність параметрів із певною варіативністю (рис. 1б). Всі показники якості зворотної води ОСО перебувають у межах нормативних значень (табл. 1). Дослідження якості води річки Стир за 2023 рік демонструє загальну відповідність більшості параметрів екологічним нормативам (рис. 1в).

**Аналіз головних компонент (РСА).** Початкові змінні концентрацій фізико-хімічних показників якості досліджуваних вод при проведенні

РСА були трансформовані у нові незалежні осі – головні компоненти (PC1, PC2, PC3), та впорядковані за величиною внеску у загальну дисперсію даних (рис. 2). Перші три компоненти сумарно пояснюють 66,9% варіативності: PC1 = 39,2%, PC2 = 18,6%, PC3 = 9,1%. PC1 отримала високе навантаження на температуру, та мінеральні компоненти, зокрема концентрації Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> та K<sup>+</sup>. PC2 – сильно пов'язаний із показниками рН та ЗТ, ЗЛ, а також зворотнім компонентом концентрацією РК. PC2 вказує на відмінності у хімічному складі води: наприклад, зворотна вода має найвищі значення PC2, а річкова – найнижчі. PC3 – значною мірою визначається вмістом SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> і в меншій мірі БСК<sub>5</sub>.

**Кореляційний аналіз.** Для оцінки взаємозв'язків між фізико-хімічними показниками якості було проведено кореляційний аналіз із використанням матриць коефіцієнтів кореляції Пірсона для додаткової води, зворотної води та води річки Стир (рис. 3). Матриця рангової кореляції г для додаткової води (рис. 3а) виявила низку помірних позитивних та негативних кореляцій. Так, позитивні кореляції між рН і N–NH<sub>3</sub>, а також між температурою води з PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> і NO<sub>3</sub><sup>-</sup> вказують на важливу роль кислотно-лужної рівноваги та температурного режиму у формуванні вмісту поживних речовин (N–NH<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> і NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Натомість помірні негативні зв'язки виявлено

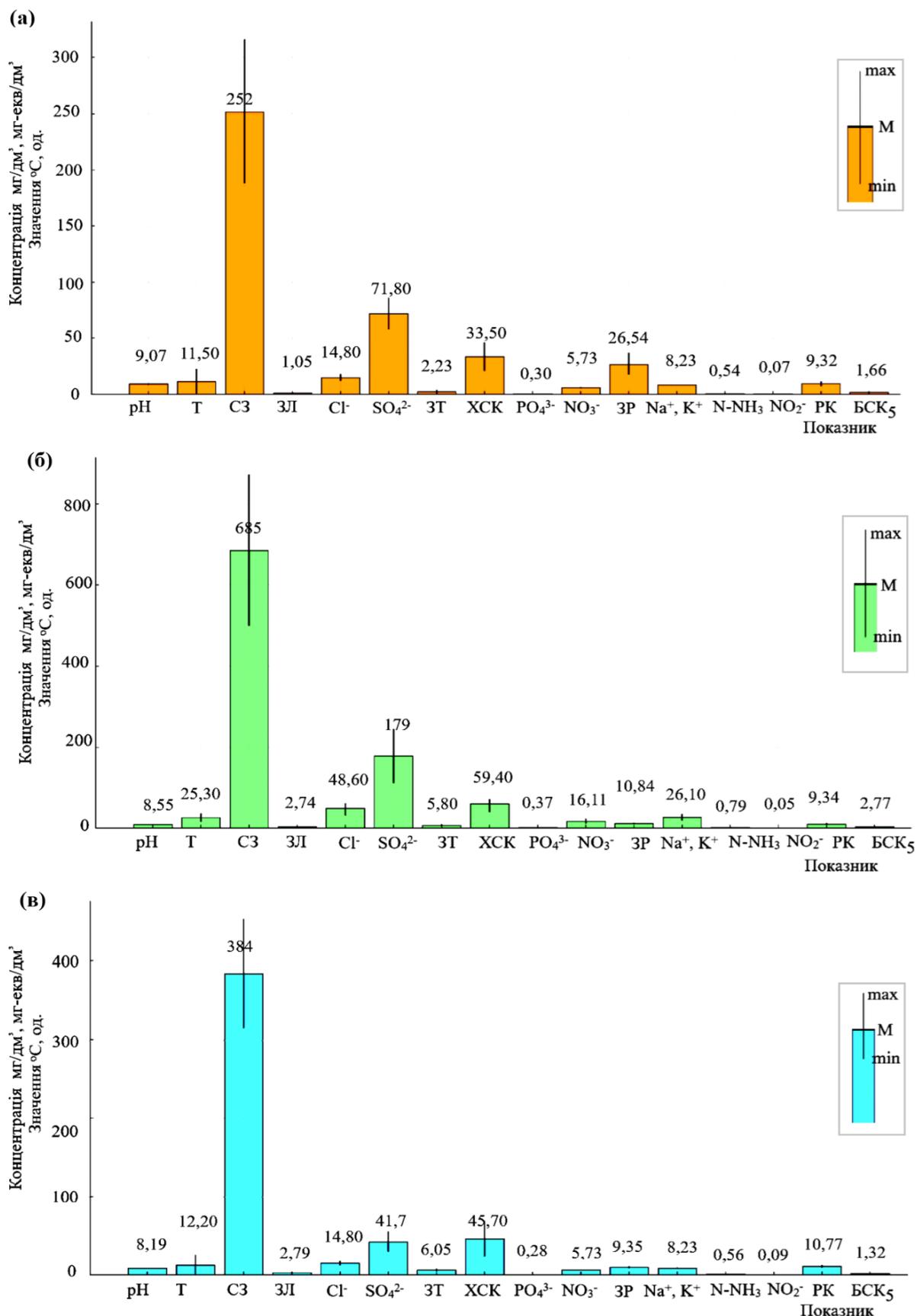


Рис. 1. Динаміка фізико-хімічних показників якості додаткової води (а), зворотної води (б), води річки Стир (в) /

Fig. 1. Dynamics of quality indicators for additional water (a), return water (б), and water from the Styr River (в)

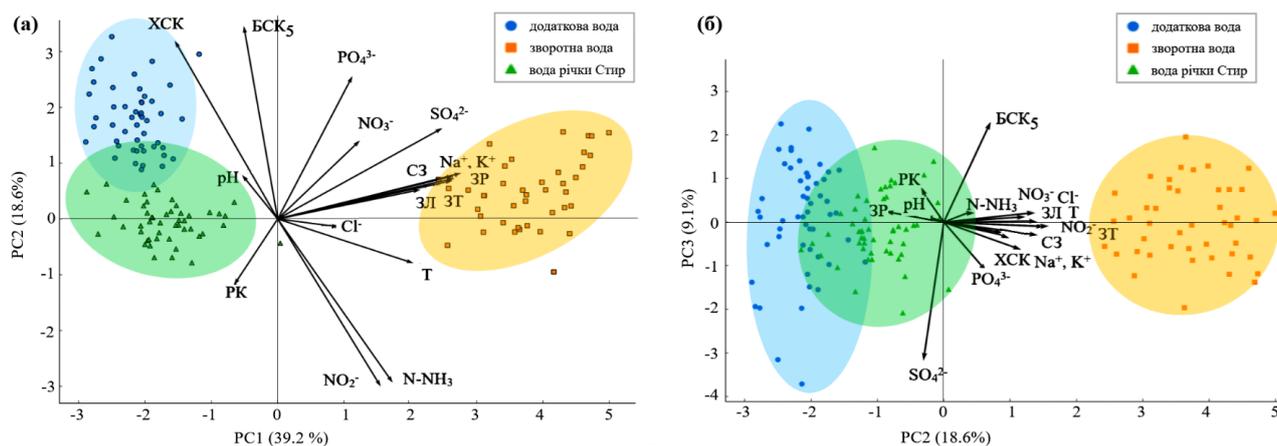


Рис. 2. Результати PCA для фізико-хімічних показників якості досліджуваних вод для PC1 та PC2 (а), PC2 та PC3 (б) / Fig. 2. PCA results for water quality indicators for PC1 and PC2 (a), PC2 and PC3 (b)

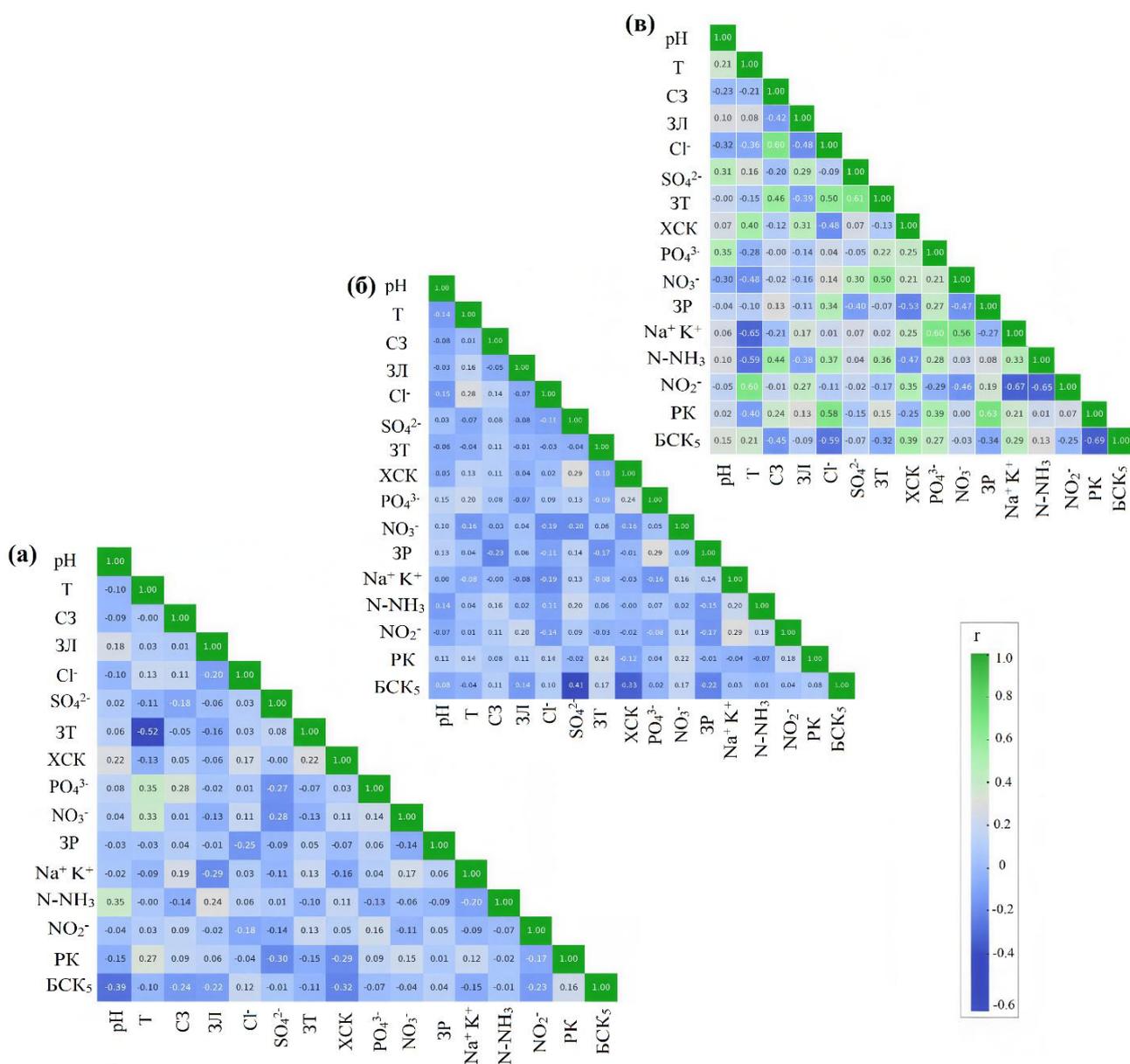


Рис. 3. Матриця коефіцієнтів рангової кореляції Пірсона для фізико-хімічних показників якості додаткової води (а), зворотної води (б), води річки Стир (в) / Fig. 3. Matrix of Pearson's rank correlation coefficients for the quality indicators of additional water (a), return water (б), and water from the Styr River (в)

між  $\text{SO}_4^{2-}$  та РК, температурою води і БСК<sub>5</sub>, а також температурою та ЗТ. У зворотній воді (рис. 3б) кореляційний аналіз виявив переважно негативні залежності. Зокрема, ХСК виявляє негативний помірний зв'язок із БСК<sub>5</sub>, що свідчить про домінування у складі води органічних сполук, стійких до біологічного розкладу. Кореляційний аналіз для води річки Стир (рис. 3в) виявив значущі як позитивні, так і негативні залежності. Зафіксована сильна позитивна кореляція між температурою та  $\text{NO}_3^-$ , що може бути наслідком інтенсифікації нітрифікаційних процесів у теплий період, також між  $\text{Cl}^-$  і РК. Помірні позитивні зв'язки між рН та  $\text{SO}_4^{2-}$ , а також між ХСК і температурою вказують на залежність розчинності органічних та мінеральних сполук від гідрохімічних умов (температури та кислотності). Натомість негативні зв'язки проявляються між температурою та  $\text{N-NH}_3$ ,  $\text{Na}^+$  і  $\text{K}^+$ , між БСК<sub>5</sub> і  $\text{Cl}^-$ , та між ХСК і ЗР.

**Кластерний аналіз (КА) і регресійні залежності.** КА профілів концентрацій фізико-хімічних показників підтвердив різномірний характер формування їх профілів під час переходу від додаткової води через технологічну схему ОСО до річкової точки контролю річки Стир (рис. 4). За результатами кластеризації було виділено три основні групи параметрів. Кластер 1 об'єднує фізико-хімічні показники ХСК та  $\text{SO}_4^{2-}$ , для яких спостерігалось суттєве зростання концентрацій у зворотній воді порівняно з додатковою та річковою. Це свідчить про їхню залежність від процесів водопідготовки та концентраційних ефектів в оборотній системі охолодження. Кластер 2 включає поживні речовини ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{N-NH}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), які демонструють виразні зміни у зворотних водах і відображають прямий вплив скидів на гідрохімічний стан річки. Кластер 3 охоплює параметри зі складнішою або менш вираженою поведінкою. Вони частково зазнають біологічної трансфор-

мації, можуть мати локальні джерела надходження або залежати від процесів седиментації, що зумовлює відмінності їхніх профілів від попередніх кластерів. Для фізико-хімічних показників кластерів 1 та 2 розраховані регресійні моделі, що описують залежність між концентраціями у зворотній та річковій воді (рис. 5а–г). Найбільш чіткі лінійні зв'язки встановлено для  $\text{SO}_4^{2-}$  та  $\text{NO}_3^-$ , для яких  $R^2$  перевищує 0,7. Це означає, що варіації їхніх концентрацій у річковій воді значною мірою зумовлені впливом скидів.

**Інтегральні індекси якості води.** За індексом сольового складу ( $I_c = 1,25$ ), якість води річки Стир на ділянках до та за скидом зворотної води РАЕС залишається на високому рівні, що свідчить про відсутність значного антропогенного навантаження солей (рис. 6а) та стан води характеризується як відмінний, ступень чистоти - дуже чистий. Індекс трофо-сапробіологічного стану ( $I_{тс} = 3,25$ ) вказує на середній рівень забруднення, стан характеризується як добрий, а ступень чистоти - слабо забруднені (рис. 8а). За специфічними індексами: значення  $OPI = 0,15 \pm 0,05$  свідчить про помірне органічне навантаження, та хорошу якість води; значення  $NPI = 1,56 \pm 0,83$  не перевищує поріг 3, що вказує середнє забруднення поживними речовинами  $\text{N-NO}_3^-$  і  $\text{P-PO}_4^{3-}$ ; та  $EI = 0,08 \pm 0,38$ , значення якого не перевищує 1, що свідчить про відсутність евтрофікування (рис. 6б-г).

**Обговорення отриманих результатів.** Результати дослідження підтверджують, що внесок техногенного впливу може бути нерівномірним за групами фізико-хімічних показників і може проявляється у специфічних закономірностях, пов'язаних із процесами водопідготовки, концентраційними ефектами в ОСО та біохімічними трансформаціями у річковому середовищі. Кластеризація фізико-хімічних показників виявила групу параметрів ( $\text{SO}_4^{2-}$ , ХСК), що зазнають найбільш

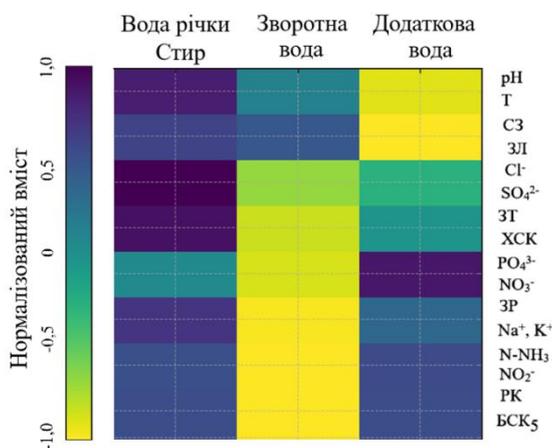


Рис. 4. Кластеризація концентрацій профілів фізико-хімічних показників за їх профілем / Fig. 4. Clustering of concentrations of profiles of physicochemical indicators according to their profile

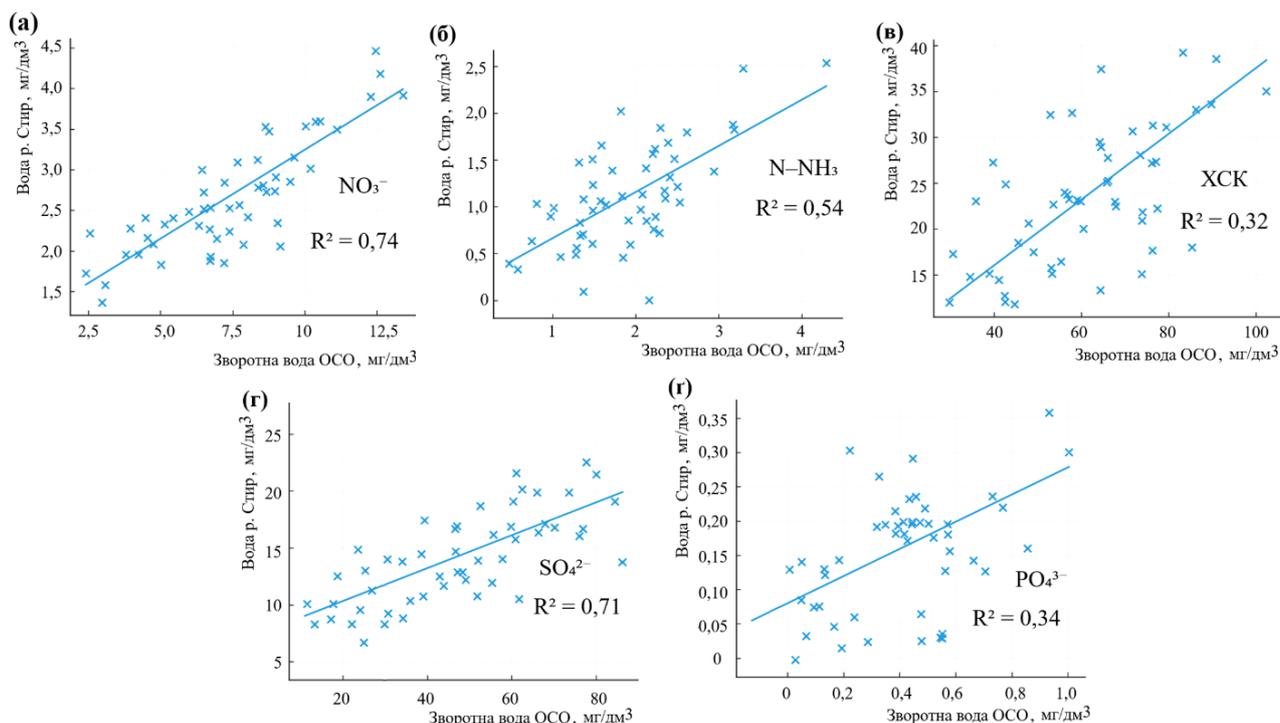


Рис. 5. Регресійні залежності концентрацій фізико-хімічних показників в зворотній воді та воді річки Стир (а -  $\text{NO}_3^-$ ; б -  $\text{N-NH}_3$ ; в - XCK; г -  $\text{SO}_4^{2-}$ ; е -  $\text{PO}_4^{3-}$ ) /

Fig. 5. Regression dependencies of concentrations of indicators in return water and water of the Styr River (а -  $\text{NO}_3^-$ ; б -  $\text{N-NH}_3$ ; в - XCK; г -  $\text{SO}_4^{2-}$ ; е -  $\text{PO}_4^{3-}$ ) /

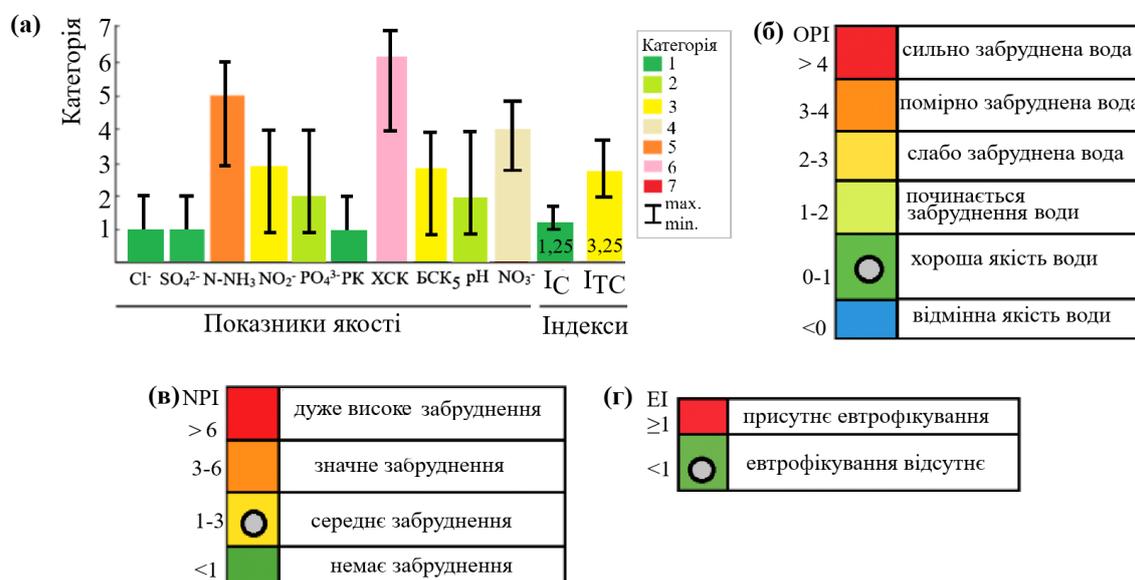


Рис. 6. Категорії якості води річки Стир за індексами  $I_C$  та  $I_{TC}$  (а), і значення OPI (б), NPI (в), EI (г) та їх інтерпретація / Fig. 6. Water quality categories of the Styr River according to  $I_C$  and  $I_{TC}$  indices (а), and OPI (б), NPI (в), EI (г) values and their interpretation

виразних змін у зворотних водах і демонструють тісні регресійні зв'язки з річковими концентраціями ( $R^2 > 0,7$ ). Це свідчить про їхнє безпосереднє походження від процесів водопідготовки та концентраційних ефектів ОСО. Подібні закономірності характерні для малотрансформованих речовин, які у водному середовищі є відносно інертними та відображають техногенний внесок

[24]. Для показників  $\text{N-NH}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  характерні помірні значення коефіцієнтів детермінації ( $R^2 = 0,3-0,7$ ), що свідчить про поєднання техногенного і природного впливу. Біохімічні процеси - нітрифікація, денітрифікація, асиміляція та адсорбція на мінеральних частках - модифікують їхній вміст, а сезонні коливання температури води додатково визначають інтенсивність транс-

формацій [25]. Позитивні кореляції між температурою, вмістом біогенних елементів (N, P) і органічними речовинами підтверджують ключову роль термічного режиму в регуляції біохімічних процесів. Водночас негативні зв'язки, зокрема між показниками органічного забруднення (ХСК, БСК<sub>5</sub>) та мінеральними іонами (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>), свідчать про різну природу джерел їхнього надходження та конкурентні процеси накопичення органічної і мінеральної складових у річковій екосистемі [26].

Результати нашого дослідження узгоджуються з висновками інших науковців. Зокрема, на Південно-Українській АЕС встановлено, що характеристики системи скиду зворотних вод впливають на забруднення приймаючої водойми за концентрацією міді, що підтверджує значний вплив техногенних факторів на якість води [27]. У випадку Бурштинського водосховища спостерігалися просторові відмінності у показниках якості залежно від місця відбору проб, що також підтверджує складність просторово-часової динаміки впливу антропогенних джерел [28]. Інші дослідження підкреслюють важливість контролю водно-хімічного режиму оборотних систем охолодження електростанцій для забезпечення належної якості води [29]. Застосований PCA підтвердив, що основні відмінності у складі вод формуються групами змінних фізико-хімічних показників, що корелюють між собою та визначають просторово-часову варіацію. Перша головна компонента (PC1, 39,2%) відображає роль температури та іонних компонентів, друга (PC2,

18,6%) - вплив ЗТ, ЗЛ та кисневого режиму, третя (PC3, 9,1%) виділяє SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> і БСК<sub>5</sub> як окремі чинники технологічного навантаження [30–31]. Це добре узгоджується з результатами кореляційного аналізу для додаткової, зворотної та річкової вод [32–33].

Більшість параметрів якості води річки Стир на ділянках до та після скиду зворотної води РАЕС (табл. 2) відповідають екологічним нормативам. Водночас зафіксовано випадки перевищення: рівень рН досягав 8,66 од., що перевищує верхню межу нормативу (8,5 од.); значення ХСК сягало 83,2 мгО/дм<sup>3</sup> при ГДК 50 мгО/дм<sup>3</sup>; концентрація PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> до 0,798 мг/дм<sup>3</sup> (ГДК 0,7 мг/дм<sup>3</sup>); N-NH<sub>3</sub> до 2,13 мг/дм<sup>3</sup> (ГДК 0,5 мг/дм<sup>3</sup>); БСК<sub>5</sub> до 3,87 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> (ГДК 3,0 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>). Такі перевищення свідчать про періодичні проблеми з органічним і трофічним навантаженням. Проте важливо відзначити, що вони спостерігаються у контрольній фонівій точці до скиду зворотної води РАЕС. Більш того, важливо відмітити, що середні концентрації фізико-хімічних показників річки на обох контрольованих ділянках не перевищують екологічних нормативів. Інтегральні індекси показали, що вода річки Стир на ділянках до та після скиду зворотної води РАЕС відповідає задовільному - доброму класу якості. Вода характеризується високою чистотою за мінеральними компонентами й не перебуває у стані евтрофікації. Це вказує на ефективність природних процесів самоочищення та відносно обмежений вплив техногенних джерел у даному регіоні.

Серед обмежень цього дослідження – фоку-

Таблиця 2 / Table 2

Значення фізико-хімічних показників якості технологічних вод оборотної системи та води річки Стир (2023 р.) / Quality indicators for process water in the recirculation system and water from the Styr River (2023)

Параметр	M ± SD			
	Додаткова вода ОСО	Зворотна вода ОСО	Вода річки Стир	
			До скиду	Після скиду
рН, од.	9,07 ± 0,65	8,55 ± 0,13	8,15 ± 0,20	8,19 ± 0,25
T, °C	11,5 ± 10,6	25,3 ± 9,9	11,4 ± 10,2	12,2 ± 11,2
СЗ, мг/дм <sup>3</sup>	252 ± 64	685 ± 186	243 ± 88	258 ± 69
ЗЛ, мг-екв/дм <sup>3</sup>	1,05 ± 0,58	2,74 ± 0,58	2,65 ± 0,52	2,79 ± 0,65
Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	14,8 ± 2,9	48,6 ± 18,2	14,4 ± 3,0	14,8 ± 2,9
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	71,8 ± 14,4	179 ± 67	38,7 ± 8,5	41,7 ± 12,5
ЗТ, мг-екв/дм <sup>3</sup>	2,23 ± 1,53	5,80 ± 2,06	6,35 ± 1,54	6,05 ± 1,32
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,302 ± 0,185	0,368 ± 0,258	0,097 ± 0,122	0,095 ± 0,135
ХСК, мг/дм <sup>3</sup>	33,5 ± 12,6	59,4 ± 20,5	43,4 ± 21,3	45,7 ± 22,5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	5,73 ± 0,38	16,11 ± 5,76	5,66 ± 0,32	5,73 ± 0,38
ЗР, мг/дм <sup>3</sup>	26,54 ± 9,34	10,84 ± 1,34	9,12 ± 0,91	9,35 ± 1,03
Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	8,23 ± 0,5	26,1 ± 7,9	8,31 ± 0,52	8,23 ± 0,50
N-NH <sub>3</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	0,54 ± 0,05	0,79 ± 0,65	0,53 ± 0,05	0,56 ± 0,05
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,067 ± 0,07	0,047 ± 0,023	0,072 ± 0,08	0,069 ± 0,06
РК, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	10,21 ± 2,38	9,34 ± 1,85	11,31 ± 3,05	10,76 ± 1,55
БСК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	1,66 ± 0,25	1,95 ± 0,35	1,21 ± 0,12	1,32 ± 0,17

сування переважно на фізико-хімічних показниках якості води без урахування біологічних ефектів та можливі відхилення під час екстремальних погодних умов. Подальші дослідження будуть спрямовані на врахування біологічних чинників та порівняння динаміки фізико-хімічних показників якості води річки Стир із іншими річками, що зазнають впливу подібних технологічних процесів. Загалом результати підтверджують необхідність постійного моніторингу та вдосконалення технологій водопідготовки з метою зниження техногенного навантаження й забезпечення екологічної безпеки.

#### Висновки.

1. Проведений упродовж 2023 року щотижневий моніторинг додаткової, зворотної та річкової вод дозволив виявити просторово-часові закономірності варіювання фізико-хімічних показників якості води. Отриманий масив даних є репрезентативною основою для подальшого кількісного оцінювання технологічного й екологічного стану вод.

2. Фізико-хімічні показники якості додаткової та зворотної води переважно відповідали експлуатаційним нормам і допустимим концентраціям, а вода річки Стир, екологічним нормативам ГДК. Зафіксовані поодинокі перевищення рН, ХСК, БСК<sub>5</sub>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> та N-NH<sub>3</sub> мали епізодичний характер і не були безпосередньо пов'язані зі скидом зворотної води, а ймовірно роблять інші джерела, розташовані вище за течією.

3. За результатами PCA три головні компоненти сумарно пояснюють 66,9% варіацій. Перша компонента (PC1=39,2%) відображає вплив температури та іонного складу (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>), друга (PC2=18,6%) роль ЗЛ, ЗТ та РК, третя (PC3=9,1%) внесок SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> і БСК<sub>5</sub>. Це свідчить, що визначальними чинниками формування якості води є температура та компоненти іонного складу.

4. Матриці коефіцієнтів кореляції Пірсона виявили суттєві зв'язки між окремими показни-

ками. Позитивні кореляції між температурою та NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, а також між рН і N-NH<sub>3</sub>, вказують на залежність нітрифікаційних процесів від температурного та кислотно-лужного режимів. Негативні зв'язки між ХСК і БСК<sub>5</sub> або між SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> і РК відображають різну природу джерел органічних та неорганічних сполук у водному середовищі.

5. Кластеризація фізико-хімічних показників показників дозволила виокремити групи: параметри, що зростають у зворотній воді (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, ХСК) та біогенні елементи (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, N-NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Чіткі лінійні зв'язки, за результатами регресійного аналізу, у зворотній та річковій воді встановлені для показників SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> та NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, для яких коефіцієнт детермінації перевищує 0,7.

6. Встановлення контрольних значень у точці до скиду зворотної води РАЕС дало змогу визначити фонові концентрації основних показників. Порівняння з концентраціями фізико-хімічних показників після скиду показало, що найбільш виражений техногенний внесок спостерігається для SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> та РК, тоді як решта параметрів на ділянках річки Стир до та за скидом коливається в межах ±SD.

7. Вода річки Стир на ділянках до та скидом зворотної води РАЕС характеризується високою чистотою за сольовим складом (ІС = 1,25), низьким рівнем органічного забруднення (ОПІ = 0,15) і відсутністю евтрофікації (ЕІ = 0,08). Індекс трофо-сапробіологічного стану (ІТС = 3,25) та індекс забруднення біогенними речовинами (NPI = 1,56) відповідають доброму екологічному класу якості.

8. Отримані результати свідчать, що експлуатація ОСО РАЕС не спричиняє суттєвого погіршення екологічного стану річки Стир. Водночас наявність періодичного трофо-органічного навантаження підкреслює необхідність постійного профілактичного моніторингу, з урахуванням фонових і сезонних коливань, для підтримання екологічної стабільності водотоку та сталого управління водними ресурсами.

#### Список використаних джерел

1. Biedunkova, O., Kuznietsov, P., Mandryk, O. (2025). Study of the dominant modes of formation and variability of potentially toxic element concentrations and their impact on environmental quality. *Chemosphere*, 388, 144688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144688>
2. Kuznietsov, P., Biedunkova, O. (2025). The role of carbonate equilibrium in scale formation of calcium carbonate in a power plant open recirculating system. *Data-Centric Engineering*, 6, e13. DOI: <https://doi.org/10.1017/dce.2025.9>
3. Biedunkova, O., Kuznietsov, P., Pinchuk, O. (2025). Comprehensive assessment of scale formation, corrosion, and biological pollution in a cooling water supply system. *MethodsX*, 14, 103154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103154>
4. Abbas, Q., Yaqoob, H., Sajjad, U., Ali, H. M., Jamil, M. M. (2025). Utilization of local coal in Pakistan's oil-fired power plants and future clean technologies for power generation. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csee.2025.101132>
5. Kurek K, Młyński D, Bugajski P, Nowobilaska-Majewska E. (2019). The Impact of Treated Sewage on Water Quality in Mordarka Stream. *Journal of Ecological Engineering*. 20(1) 39–45. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/93874>

6. Biedunkova, O., Kuznietsov, P. (2025). Integration of water management in the assessment of the impact of heavy metals discharge from the power plant with mitigation strategies. *Ecological Indicators*, 175, 113618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113618>
7. Водний кодекс України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 16.08.2025)
8. Директива Європейського Парламенту і Ради 2000/60/ЄС від 23 жовтня 2000 року про встановлення рамок заходів Співтовариства в галузі водної політики. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_962#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text) (дата звернення: 16.08.2025)
9. Порядок розроблення нормативів гранично допустимого скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти та переліку забруднюючих речовин, скидання яких нормується (затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 11 вересня 1996 р. № 1100 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1100-96-n> (дата звернення: 16.08.2025)
10. Правила охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/465-99-n> (дата звернення: 16.08.2025)
11. Дозвіл на спеціальне водокористування ВП ПАЕС № 53/RV/49d-20. (2020) URL: <https://e-services.davr.gov.ua/> (дата звернення: 16.08.2025)
12. Malovanyu, M., Boiaryn, M., Biedunkova, O., Voloshyn, V., Netrobchuk, I. (2025). The impact of the ecological sustainability of landscapes on the formation of the hydro-ecological state in the upper part of the Prypiat River basin. *Ecological Questions*, 36(2), 1-21. DOI: <https://doi.org/10.12775/EQ.2025.018>
13. Boiaryn, M., Biedunkova, O., Netrobchuk, I., Radzii, V., Voloshyn, V. (2023). Assessment of ecological sustainability of the landscape of the Prypiat River basin within the Volyn region. *Scientific Horizons*, 26(12), 99-111. DOI: <https://doi.org/10.48077/scihor12.2023.99>
14. Інженірингова та науково-технічна підтримка. Водно-хімічний режим системи технічного водопостачання відповідальних споживачів АЕС з ВБЕР. Загальні вимоги. СОУ НАЕК 067:2023. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=109230](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=109230) (дата звернення: 16.08.2025)
15. Нормативи екологічної безпеки водних об'єктів, що використовуються для потреб рибного господарства, щодо гранично допустимих концентрацій органічних та мінеральних речовин у морських та прісних водах (біохімічного споживання кисню (БСК-5), хімічного споживання кисню (ХСК), завислих речовин та амонійного азоту). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1369-12#Text> (дата звернення: 16.08.2025)
16. СОУ 05.01-37-385:2006 (2006). Вода рибогосподарських підприємств. Загальні вимоги та норми. Національний стандарт України. Київ, 15.
17. Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення (затверджено наказом Міністерства охорони здоров'я України 02 травня 2022 року № 721 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text> (дата звернення: 16.08.2025)
18. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями (2012). А.В. Гриценко, О.Г. Васенко, Г.А. Верніченко та ін. Х.: УкрНДІЕП, 37.
19. Про затвердження Методики визначення масивів поверхневих та підземних вод. Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 14.01.2019р. № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0287-19#Text> (дата звернення: 16.08.2025)
20. Isiuku, B. O., Enyoh, C. E. (2020). Pollution and health risks assessment of nitrate and phosphate concentrations in water bodies in South Eastern, Nigeria. *Environmental Advances*, 2, 100018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100018>
21. Chen, C. W., Ju, Y. R., Chen, C. F., Dong, C. D. (2016). Evaluation of organic pollution and eutrophication status of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 113, 318–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.03.024>
22. Biedunkova, O., Kuznietsov, P., Korbutiak, V. (2025). A study of surface water quality using organic pollution indicators: Comparative characteristics and educational opportunities. *Water Quality Research Journal*, 60(2), 333-347. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2025.044>
23. Kuznietsov, P., Biedunkova, O. (2025). Application of multivariate statistical techniques for assessing spatiotemporal variations of heavy metal pollution in freshwater ecosystems. *Water Conservation Science and Engineering*, 10(1), 13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41101-025-00341-8>
24. Biletska, Y., Djukareva, G., Nekos, A., Husliev, A., Krivtsova, A., Bakirov, M., Polupan, V., Onyshchenko V., Sokolova, E. (2020). Investigation of change of quality indicators of gluten-free bread during storage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(11 (107)), 54–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215019>
25. Nekos, A. N., & Boiaryn, M. V. (2022). Environmental Assessment of Water Quality of the Styr River (within the City of Lutsk). In 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 1, pp. 1-5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580157>
26. Bezsonnyi, V., Nekos, A. (2022). Modeling of the oxygen regime of the Chervonooskilsky reservoir. In 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 1, pp. 1-5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580216>

27. Holoptsev, A. V., Dremuh, E., Abibulaeva, A. (2012). Impact Characteristics of Water Circulation Lead System for Pollution NPP Cooling Pond its Copper (On the Example of South-Ukrainian NPP). *Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University series «Ecology»*, (1004), 114-123. DOI: <https://periodicals.karazin.ua/ecology/article/view/831>
28. Rychak, T. L., Arkhypova, L. M. (2024). Environmental and toxicological assessment of the water quality of Burshtynska TPP cooling reservoir. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (30), 91-104. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-07>
29. Кишневский, В. А., & Чиченин, В. В. (2014). Дослідження показників хімічного контролю водно-хімічного режиму оборотних систем охолодження електростанцій. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8(70)), 57–62. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26312>
30. Kuznietsov, P., & Biedunkova, O. (2023). Експериментальні випробування біоцидної обробки охолоджуючої води систем безпеки енергоблоків Рівненської атомної електростанції. *Ядерна та радіаційна безпека*, (1(97)), 30-40. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.1\(97\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.1(97).04)
31. Biedunkova, O., Kuznietsov, P. (2024). Dataset on heavy metal pollution assessment in freshwater ecosystems. *Scientific Data*, 11(1), 1241. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-024-04116-z>
32. Xu, L., Xin, B., Liu, W., Liu, H., Yang, G., Hao, G. (2025). Biogeochemical Mechanisms of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca Water and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> Pollution in a Typical Piedmont Agricultural Area: Insights from Nitrification and Carbonate Weathering. *Toxics*, 13(5), 394. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics13050394>
33. Korbutiak, V. M., Stefanyshyn, D. V., Khodnevych, Y. V., Lahodniuk, O. A., Martyniuk, V. O. (2024). Analysis of current trends in water runoff of the Sluch River in terms of extraterritorial impacts of hydrotechnical construction. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1415, 1, 012102. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012102>

**Внесок авторів:** всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

**Конфлікт інтересів:** автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

## **An analysis of the formation of profiles of physical and chemical indicators discharge in the context of compliance with the environmental quality of the recipient river**

*Mykola Klymenko*<sup>1</sup>

DSc (Agricultural), Professor, Head of the Department of Ecology, Environmental Protection Technologies and Forestry,

<sup>1</sup> National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine;

*Liudmyla Romanchuk*<sup>2</sup>

DSc (Agriculture), Professor, Department of Ecology and Environmental Protection Technologies,

<sup>2</sup> Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine;

*Olha Biedunkova*<sup>1</sup>

DSc (Biology), Professor, Department of Ecology, Environmental Protection Technologies and Forestry;

*Nataliia Vozniuk*<sup>1</sup>

PhD (Agricultural), Professor, Department of Ecology, Environmental Protection Technologies and Forestry;

*Olena Likho*<sup>1</sup>

PhD (Agricultural), Associate Professor, Professor of the Department of Ecology, Environmental Protection Technologies and Forestry

### **ABSTRACT**

**Introduction.** Rivne Nuclear Power Plant, located on the Styr River, releases return water into the river without pre-treatment. While radiological impacts are well controlled, non-radiological effects remain poorly studied. **The purpose** of this work was to assess the non-radiological influence of Rivne NPP's ORCS discharges on the physicochemical quality of the river. The research object comprised additional return cooling waters from the Rivne NPP and water from the river in the discharge zone. The subject was the variation of physicochemical quality indicators and their compliance with operational, discharge, and environmental standards.

**Methods.** In 2023, weekly sampling was performed for additional cooling water, return water from the ORCS, and Styr River water downstream of the discharge. Measured parameters included pH, temperature, dry residue, alkalinity, hardness, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, N-NH<sub>3</sub>, SS, DO, COD, and BODs. Analyses were conducted according to standardized methods. The data were compared with operational standards, permissible concentrations in return water and maximum permissible concentrations (MPC) for the environment. The water quality of the river was assessed

using the following indices: salinity (SC), trophic-saprobological state (TSS), organic pollution (OPI), nutrient pollution (NPI), and eutrophication (EI). Statistical analysis included descriptive statistics, Pearson correlation, cluster analysis and principal component analysis (PCA) using JASP version 0.14.3.

**Results and Discussion.** Return water parameters were stable and within discharge standards. Styr River water largely met ecological MACs, but sporadic exceedances occurred: pH up to 8.66 (above 8.5), COD up to 83.2 mgO<sub>2</sub>/L (MAC = 50 mgO<sub>2</sub>/L), ammonium nitrogen up to 2.13 mg/L (MAC = 0.5 mg/L), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> up to 0.798 mg/L (MAC = 0.7 mg/L), and BOD<sub>5</sub> up to 3.87 mgO<sub>2</sub>/L (MAC = 3 mgO<sub>2</sub>/L). These deviations were observed both upstream and downstream of the discharge, suggesting non-local sources unrelated to NPP activity. PCA identified three principal components explaining 66.9% of variance: PC1 (39.2%) linked to temperature and mineralization (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>), PC2 (18.6%) related to pH, alkalinity, hardness, and dissolved oxygen, and PC3 (9.1%) defined by SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and BOD<sub>5</sub>. Positive correlations were found between temperature and nitrates, pH and ammonium, and negative correlations between COD and BOD<sub>5</sub> or SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and BOD<sub>5</sub>. Cluster analysis showed that SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and N-NH<sub>3</sub> demonstrate the most consistent relationships between the return water and the Styr River. According to the integral indices (IC, ITS, OPI, NPI, EI), it was found that the river water is characterized by a high degree of purity in terms of salt composition (IC = 1.25), the absence of eutrophication (EI = 0.08) and a low level of organic pollution (OPI = 0.15), with a slight trophic-saprobic load (ITS = 3.25) and moderate nutrient pollution (NPI = 1.56).

**Conclusions.** Rivne NPPs ORCS return water met permissible concentrations, indicating effective cooling and water treatment. Styr River water generally complied with ecological MACs, and rare exceedances were not linked to Rivne NPP. PCA and correlation analyses identified temperature and mineralization as the main drivers of variability. Overall water quality is good but requires preventive, continuous monitoring and improved water management to ensure long-term ecological stability and environmental safety.

**Keywords:** environmental safety, water discharge, return water, regression dependencies, principal component analysis, cluster analysis, water quality indices, water quality indicators, environmental standards.

### References

1. Biedunkova, O., Kuznietsov, P., Mandryk, O. (2025). Study of the dominant modes of formation and variability of potentially toxic element concentrations and their impact on environmental quality. *Chemosphere*, 388, 144688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144688>
2. Kuznietsov, P.; Biedunkova, O. (2025). The role of carbonate equilibrium in scale formation of calcium carbonate in a power plant open recirculating system. *Data-Centric Engineering*, 6, e13. <https://doi.org/10.1017/dce.2025.9>
3. Biedunkova, O.; Kuznietsov, P.; Pinchuk, O. (2025). Comprehensive assessment of scale formation, corrosion, and biological pollution in a cooling water supply system. *MethodsX*, 14, 103154. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103154>
4. Abbas, Q.; Yaqoob, H.; Sajjad, U.; Ali, H. M.; Jamil, M. M. (2025). Utilization of local coal in Pakistan's oil-fired power plants and future clean technologies for power generation. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101132. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2025.101132>
5. Kurek, K.; Młyński, D.; Bugajski, P.; Nowobilska-Majewska, E. (2019). The impact of treated sewage on water quality in Mordarka Stream. *Journal of Ecological Engineering*, 20(1), 39–45. <https://doi.org/10.12911/22998993/93874>
6. Biedunkova, O.; Kuznietsov, P. (2025). Integration of water management in the assessment of the impact of heavy metals discharge from the power plant with mitigation strategies. *Ecological Indicators*, 175, 113618. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113618>
7. Water Code of Ukraine. Available online: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]
8. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. Available online: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_962#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text) (accessed on 16 August 2025).
9. Regulation on the development of standards for the maximum permissible discharge of pollutants into water bodies and the list of pollutants subject to regulation. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1100 of 11 September 1996. Available online: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1100-96-n> (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]
10. Rules for the protection of surface waters from pollution by return waters. Available online: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/465-99-n> (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]
11. Permit for special water use of Rivne NPP No. 53/RV/49d-20. (2020). Available online: <https://e-services.davr.gov.ua/> (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]
12. Malovanyy, M.; Boiaryn, M.; Biedunkova, O.; Voloshyn, V.; Netrobchuk, I. (2025). The impact of the ecological sustainability of landscapes on the formation of the hydro-ecological state in the upper part of the Prypiat River basin. *Ecological Questions*, 36(2), 1–21. <https://doi.org/10.12775/EQ.2025.018>
13. Boiaryn, M.; Biedunkova, O.; Netrobchuk, I.; Radzii, V.; Voloshyn, V. (2023). Assessment of ecological sustainability of the landscape of the Prypiat River basin within the Volyn region. *Scientific Horizons*, 26(12), 99–111. <https://doi.org/10.48077/scihor12.2023.99>
14. Engineering and Scientific-Technical Support. Water-chemical regime of technical water supply systems of responsible consumers of NPPs with VVER. General requirements. SOU NNEGC 067:2023. Available online:

- [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=109230](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=109230) (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]
15. Environmental safety standards for water bodies used for fish farming regarding maximum allowable concentrations of organic and mineral substances. Available online: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1369-12#Text> (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]
  16. SOU 05.01-37-385:2006 (2006). Water of fishery enterprises. General requirements and norms. National Standard of Ukraine. Kyiv, 15. [in Ukrainian]
  17. On the approval of Hygienic Standards for Water Quality in Water Bodies for Drinking, Domestic and Other Needs of the Population (approved by Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 721 of 2 May 2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text> (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]
  18. Methodology for environmental assessment of surface water quality by relevant categories (2012). A.V. Gritsenko, O.G. Vasenko, G.A. Vernichenko et al. Kharkiv: UkrNDIEP, 37. [in Ukrainian]
  19. On approval of the Methodology for determining surface and groundwater bodies. Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine dated 14 January 2019, 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0287-19#Text> (accessed on 16 August 2025) [in Ukrainian]
  20. Isiuku, B. O.; Enyoh, C. E. (2020). Pollution and health risks assessment of nitrate and phosphate concentrations in water bodies in South Eastern, Nigeria. *Environmental Advances*, 2, 100018. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100018>
  21. Chen, C. W.; Ju, Y. R.; Chen, C. F.; Dong, C. D. (2016). Evaluation of organic pollution and eutrophication status of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 113, 318–324. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.03.024>
  22. Biedunkova, O.; Kuznietsov, P.; Korbutiak, V. (2025). A study of surface water quality using organic pollution indices: Comparative characteristics and educational opportunities. *Water Quality Research Journal*, 60(2), 333–347. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2025.044>
  23. Kuznietsov, P.; Biedunkova, O. (2025). Application of multivariate statistical techniques for assessing spatiotemporal variations of heavy metal pollution in freshwater ecosystems. *Water Conservation Science and Engineering*, 10(1), 13. <https://doi.org/10.1007/s41101-025-00341-8>
  24. Biletska, Y.; Djukareva, G.; Nekos, A.; Husliev, A.; Krivtsova, A.; Bakirov, M.; Polupan, V.; Onyshchenko, V.; Sokolova, E. (2020). Investigation of change of quality indicators of gluten-free bread during storage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(11), 54–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215019>
  25. Nekos, A. N.; Boiaryn, M. V. (2022). Environmental assessment of water quality of the Styr River (within the City of Lutsk). 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 1, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580157>
  26. Bezsonnyi, V.; Nekos, A. (2022). Modeling of the oxygen regime of the Chervonooskylsky reservoir. 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment 2022, 1, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580216>
  27. Holoptsev, A. V.; Dremuh, E.; Abibulaeva, A. (2012). Impact characteristics of water circulation lead system for pollution NPP cooling pond its copper (on the example of South-Ukrainian NPP). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series Ecology*, (1004), 114–123. <https://periodicals.karazin.ua/ecology/article/view/831>
  28. Rychak, T. L.; Arkhypova, L. M. (2024). Environmental and toxicological assessment of the water quality of Burshtynska TPP cooling reservoir. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (30), 91–104. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-07> [in Ukrainian]
  29. Kishnevskiy, V. A.; Chichenin, V. V. (2014). Study of control indicators of the water-chemical regime of recirculating cooling systems of power plants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8(70)), 57–62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26312>
  30. Kuznietsov, P.; Biedunkova, O. (2023). Experimental tests of biocidal treatment for cooling water of safety systems at Rivne NPP Units. *Nuclear and Radiation Safety*, 1(97), 30–40. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.1\(97\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.1(97).04)
  31. Biedunkova, O.; Kuznietsov, P. (2024). Dataset on heavy metal pollution assessment in freshwater ecosystems. *Scientific Data*, 11(1), 1241. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-024-04116-z>
  32. Xu, L.; Xin, B.; Liu, W.; Liu, H.; Yang, G.; Hao, G. (2025). Biogeochemical mechanisms of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca water and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pollution in a typical piedmont agricultural area: Insights from nitrification and carbonate weathering. *Toxics*, 13(5), 394. <https://doi.org/10.3390/toxics13050394>
  33. Korbutiak, V. M.; Stefanyshyn, D. V.; Khodnevych, Y. V.; Lahodniuk, O. A.; Martyniuk, V. O. (2024). Analysis of current trends in water runoff of the Sluch River in terms of extraterritorial impacts of hydrotechnical construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1415(1), 012102. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012102>

**Authors Contribution:** All authors have contributed equally to this work

**Conflict of Interest:** The authors declare no conflict of interest

Received 21 August 2025

Accepted 17 November 2025