

Бєдункова О. О., д.б.н., професор; Кузнєцов П. М., здобувач
третього рівня вищої освіти; (Національний університет водного
господарства та природокористування, м. Рівне,
o.o.biedunkova@nuwm.edu.ua; p.m.kuznietsov@nuwm.edu.ua)

ОЦІНКА ВПЛИВУ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ АНАЛІТИЧНИХ ПРОЦЕДУР ВИМІРЮВАННЯ МАКРОКОМПОНЕНТНОГО СКЛАДУ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД

У сучасних аналітичних лабораторіях для визначення окремого показника можуть використовуватися різні методи. Метрологічні характеристики, вартість аналізу та конкретні стандартні процедури, рекомендовані для екологічних, медичних чи інших цілей беруться до уваги при виборі аналітичних методологій, однак зовсім практично не враховується екологічність методів, що застосовуються в хімічному аналізі. Метод іонної хроматографії (ІХГ) є багатокомпонентним, швидким методом аналізу, що дозволяє точне вимірювання концентрації іонів. Метою даного дослідження є порівняння аналітичної екологічності процедур вимірювання концентрації макрокомпонентного хімічного складу поверхневих вод. Для іонів SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} проведено порівняння ІХГ і титриметричних методів аналізу та для Na^+ , K^+ ІХГ і методом фотометрії полум'я. Оцінка аналітичної екологічності для процедур, що досліджувались, проведена з використанням програмного забезпечення AGREE. Процедури ІХГ мали вищі показники екологічності порівняно зі стандартними методами, особливо для визначення аніонів (бал 0,82) завдяки використанню натрію бікарбонату як елюенту, на відміну від метилсульфонової кислоти, що використовується для катіонів. Полумєнева фотометрія для Na^+ і K^+ досягла найвищого балу серед стандартних методів (0,58) через відсутність хімічних реагентів, незважаючи на використання потенційно небезпечної суміші газу пропан-бутан. Найнижчі бали отримали титриметричні методи для SO_4^{2-} (0,38) і Cl^- (0,48), переважно через використання токсичних речовин, таких як барій і хромати. Титриметричні методи для Mg^{2+} і Ca^{2+}

мали бал 0,51, що значно нижче від отриманого балу екологічності для процедур ІХГ. Результати дослідження доводять, що вибір ІХГ для вимірювання макрокомпонентного хімічного складу поверхневих вод є доцільним з екологічної точки зору.

Ключові слова: аналітична екологічність; зелена аналітична хімія; макрокомпонентний склад; поверхневі води; іонна хроматографія.

Вступ. У зв'язку зі збільшенням забруднення навколишнього середовища виникає потреба у створенні екологічно чистих хіміко-аналітичних методів і процедур, які матимуть позитивний вплив на довкілля. Зелена аналітична хімія (ЗАХ) – це концепція, яка заохочує використання енергозберігаючих інструментів, зниження використання токсичних речовин або сполук, а також мінімізацію відходів під час аналітичних процедур [1]. Зокрема пріоритетними напрямками є виключення застосування в аналізі органічних розчинників, реактивів та інших матеріалів, небезпечних для людини чи екосистеми, забезпечення швидких та енергозберігаючих методологій з підтриманням стандартів якості [2]. У сучасних аналітичних лабораторіях для визначення окремого показника можуть використовуватися різні методи.

При виборі аналітичних методологій, як правило, беруться до уваги переважно метрологічні характеристики, вартість аналізу та конкретні стандартні процедури, рекомендовані для екологічних, медичних, біологічних чи інших цілей. Однак, врахування екологічності аналітичного циклу вимірювання, в більшості випадків, лишається поза увагою.

Кількісне вимірювання аналітичної екологічності є багатоваріантним, складним параметром [3]. Враховуючи сучасні природоохоронні вимоги та вимоги до застосування лабораторних реагентів [4], мінімізація впливу хімічних факторів на довкілля є важливим аспектом. Екологічна аналітична процедура та сам метод вимірювання можуть характеризуватись мінімальним або жодним використанням реагентів, ощадливим споживанням енергії та відсутністю утворення відходів. Проте, цим критеріям відповідають лише деякі аналітичні процедури, які не потребують відбору, консервування, транспортування проб та пробопідготовки.

У цілому, аналітична екологічність є важливим фактором для дослідників та виробничників, які прагнуть зменшити свій вплив на

навколишнє середовище, що потребує комплексного підходу для урахування різноманітних факторів на підставі об'єктивних та гнучких критеріїв оцінювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для кількісної оцінки аналітичної екологічності процедур використовується різноманітне програмне забезпечення. Наразі найпопулярнішими показниками безкоштовного програмного забезпечення для оцінки аналітичної екологічності є AGREE та AGREEprep [5]. Інструмент метрики AGREE зосереджений на всій методології та базується на принципах ЗАХ, тоді як метрика AGREEprep зорієнтована на оцінюванні відбору та пробопідготовки зразків. Інструмент метрики AGREE [6] базується на оцінюванні токсичності та об'ємі реактивів, утворенні відходів, споживанні енергії, кількості процедурних кроків, можливості автоматизації. Кожен принцип перетворюється на діапазон балів із відповідним внеском. Підсумковий бал визначається з оцінки всіх принципів. Результатом є піктограма (рис. 1), де остаточний рахунок і колір показані посередині (від зеленого до червоного). Загальна оцінка показана в середині піктограми зі значеннями, близькими до 1,0.



Рис. 1. Типовий результат екологічного оцінювання аналітичної процедури (ліворуч) і відповідна кольорова шкала для довідки (праворуч) з використанням метрики AGREE [7]

Серед загальних вказівок, що допомагають збільшити аналітичну екологічність відомі:

- застосування методів прямого аналізу та уникнення процедур відбору проб та пробопідготовки;
- мінімізація об'єму (маси) проби для аналізу (при неможливості уникнення етапів відбору проб та пробопідготовки);
- надавати перевагу автоматизованим методам вимірювання;

- уникати утворенню відходів при аналізі;
- застосовувати багатокомпонентні методи вимірювання, що дозволяють проводити вимірювання декілька показників одночасно;
- надавати перевагу реактивам, отриманим з відновлюваних джерел та уникати застосування токсичних речовин [8–10].

Поруч із широким представленням екологічно чистих і сталих підходів до використання методів хімічного аналізу, доступна наукова література містить досить мало відомостей щодо порівняльних досліджень аналітичної екологічності різних способів лабораторних вимірювань параметрів стану поверхневих вод.

Наприклад, для іонної хроматографії (ІХГ), що є швидким методом багатокомпонентного аналізу з точним вимірюванням концентрації катіонів [6] та аніонів [7], у літературі описуються практики ЗАХ, переважно в галузі харчової промисловості [11; 12]. Одночасно, порівняльні дослідження екологічності ІХГ лишаються вкрай обмеженими [13].

Мета, завдання та методика проведення досліджень. Метою даного дослідження було порівняння екологічності визначення макрокомпонентного хімічного складу поверхневих вод за різними методиками, відповідно принципів ЗАХ. Зокрема, для показників SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} порівнювались ІХГ метод визначення з титриметричними методами; для показників Na^+ , K^+ ІХГ методи ІХГ порівнювались з методами фотометрії полум'я. Завдання дослідження полягало в систематизації та аналізі аналітичної екологічності процедур вимірювання концентрації макрокомпонентного складу поверхневих вод, що застосовуються в хіміко-аналітичній практиці України. Оцінювання аналітичних процедур проводилось засобом метрики AGREE [7], з дотриманням методології відповідного програмного забезпечення [8].

Виклад основного матеріалу дослідження. Макрокомпонентний хімічний склад поверхневих вод визначається вмістом іонів SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , HCO_3^- та CO_3^{2-} [9; 10]. Оскільки вимірювання іонів HCO_3^- та CO_3^{2-} методом ІХГ є складною задачею та вимагає застосування градієнтного елювання [11], в цьому дослідженні це не проводилось. Типовими стандартними аналітичними процедурами вимірювання концентрації SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} в поверхневих водах, що застосовуються в Україні є титриметричні методи та метод фотометрії полум'я (таблиця).

Таблица

Характеристика стандартних аналітичних процедур вимірювання

Компонент	ДВ, мг/дм ³	δ , %	Процедура
Cl ⁻	7–1500	± 20	[12]
SO ₄ ²⁻	50–500	± 9	[13]
K ⁺ , Na ⁺	0,1–100 для K ⁺ та 1–200 для Na ⁺	-	[14]
Ca ²⁺	10–150	від 10 до 50: ± 10 ; від 50 до 150: ± 5	[15]
Mg ²⁺	10–150	± 5	

Примітка: 1) ДВ – діапазон вимірювання; 2) δ – відносна похибка вимірювань

Недолік полум'яної фотометрії полягає у тому, що відносно велика кількість елементів може бути збуджена для випромінювання світла, а це може призвести до інтерференції та помилок в аналізі. Титриметричні методи є неселективними, до того ж вимагають використання токсичних речовин в аналізі.

Прилади, що застосовують для вимірювання концентрації катіонів наведені на рис. 2, *а* та рис. 3, *а*, відповідно. Розділення іонів при ІХГ вимірюванні відбувається на іонообмінній колонці, компоненти детектуються за допомогою кондуктометричного детектору. Типова хроматограма розділення катіонів та аніонів наведена на рис. 2, *б* та рис. 3, *б*, відповідно. Серед загальновизнаних переваг ІХГ методу є можливість аналізу невеликих об'ємів проби (1–5 см³), точність, селективність, можливість автоматизації. Серед недоліків можна виділити необхідність застосування дороговартісної апаратури та складність технічного обслуговування приладів.

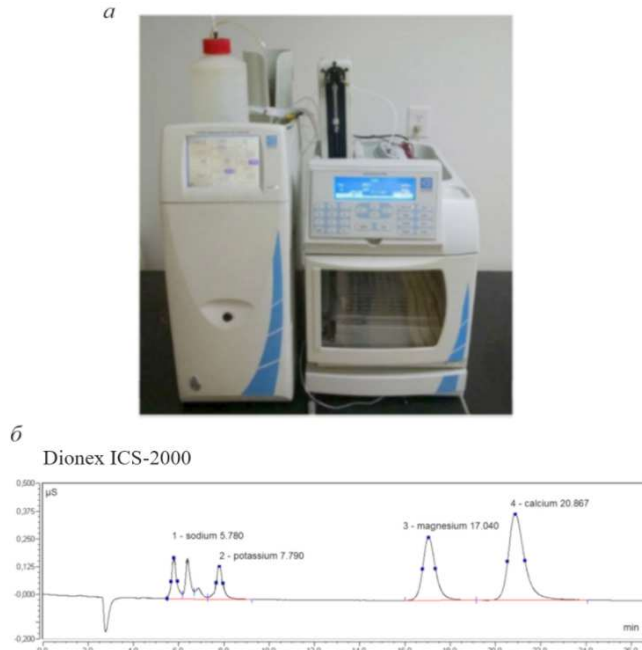


Рис. 2. Прилад ІХГ вимірювання Dionex ICS-2000 (*a*) і типова хроматограма розділення катіонів на колонці IonPac CS18 (*б*)

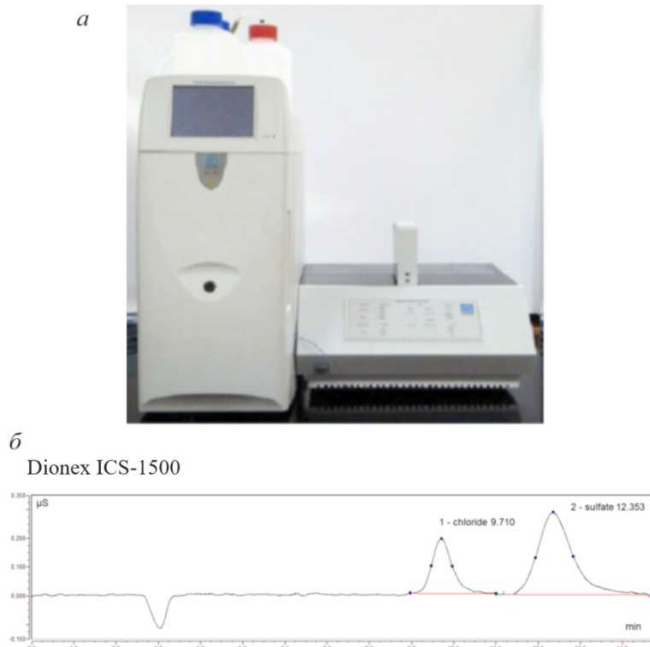


Рис. 3. Прилад ІХГ вимірювання Dionex ICS-1500 (*a*) і типова хроматограма розділення аніонів на колонці IonPac AS18 (*б*)

За результатами оцінки AGREE, процедури вимірювання концентрації макрокомпонентного складу поверхневих вод методом ІХГ отримали вищі бали аналітичної екологічності (рис. 4), порівняно зі стандартними аналітичними процедурами, що застосовуються в Україні. Вищий бал аналітичної екологічності відмічається для ІХГ визначення аніонів (бал 0,82), оскільки в якості елюенту використовується розчин бікарбонату натрію, на відміну від катіонів, де використовується метілсульфонова кислота (рис. 4, а, 4, б).

Процедура вимірювання концентрації Na^+ , K^+ методом фотометрії полум'я має найвищу аналітичну екологічність (бал 0,58) серед стандартних аналітичних процедур, що обумовлене відсутністю застосування хімічних реактивів в аналізі. Однак, при вимірюванні засобом фотометрії полум'я застосовується вибухонебезпечна суміш газу пропан-бутан (рис. 4, в). Найнижчі бали, а отже, і найнижчу аналітичну екологічність серед титриметричних методів мають процедури вимірювання концентрації SO_4^{2-} (бал 0,38) і Cl^- (бал 0,48), що передусім обумовлено застосуванням в аналізі токсичних та отруйних речовин – сполук барію та хроматів (рис. 4, г, 4, д). Процедура вимірювання Mg^{2+} , Ca^{2+} має бал 0,51 (рис. 4, е), що значно нижче від отриманої аналітичної екологічності ІХГ процедури вимірювання.

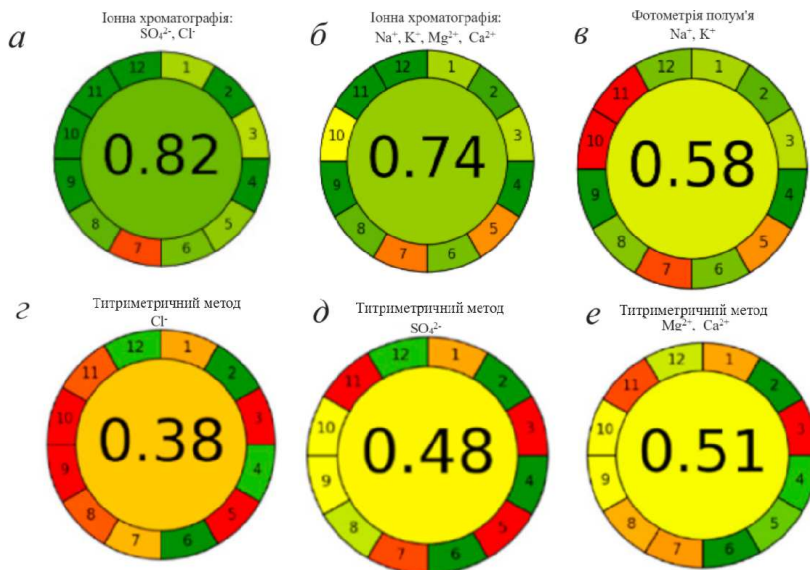


Рис. 4. Екологічність процедур вимірювання методом ІХГ (а, б); методом фотометрії полум'я (в) та титриметричними методами (г-е)

Таким чином, процедури ІХ продемонстрували вищі показники екологічності порівняно зі стандартними методами, що використовуються в Україні, особливо для визначення аніонів, завдяки використанню натрію бікарбонату як елюенту, на відміну від метилсульфонової кислоти, що використовується для катіонів. Полум'яна фотометрія досягла найвищого балу серед стандартних методів через відсутність хімічних реагентів, незважаючи на використання потенційно небезпечної суміші газу пропан-бутан. Найнижчі бали отримали титриметричні методи, переважно через використання токсичних речовин, таких як барій і хромати.

Висновки. Існує необхідність балансу між аналітичною точністю, екологічним впливом та практичною здійсненністю у виборі методів для оцінки якості поверхневих вод. Методи ІХГ забезпечують кращі екологічні показники для аналізу хімічного складу поверхневих вод (за показниками SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) порівняно з традиційними титриметричними методами та полум'яною фотометрією.

Програмне забезпечення AGREE є зручним інструментом для оцінки екологічності процедур хіміко-аналітичного вимірювання, однак при цьому слід брати до уваги метрологічні показники обраного методу.

Систематичні проведення порівняльних досліджень процедур хіміко-аналітичного вимірювання дозволять виявити критичні моменти екологічності методів та процедур, що застосовуються в хімічному аналізі, а отже, змінити їх на більш екологічні.

1. Shi M., Zheng X., Zhang N., Guo Y. et al. Overview of sixteen green analytical chemistry metrics for evaluation of the greenness of analytical methods. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2023. P. 117211.
2. Armenta S., Garrigues S., Guardia M. The role of green extraction techniques in Green Analytical Chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2015. Vol. 71. P. 2–8.
3. Tobiszewski M.; Marc M.; Gatuszka A.; Namiesnik J. Green Chemistry Metrics with Special Reference to Green Analytical Chemistry. *Molecules*. 2015. Vol. 20. P. 10928–10946.
4. Бедункова О. О., Кузнецов П. В. Методологія застосування корекційної обробки біоцидами систем технічного водопостачання електростанцій. *Вісник НУВГП. Сільськогосподарські науки* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2023. Вип. 2(102). С. 3–15. URL: <https://doi.org/10.31713/vs220231> (дата звернення: 05.05.2024).
5. Wejnerowska G., Narloch I. Comparison of the Greenness Assessment of

Chromatographic Methods Used for Analysis of UV Filters in Cosmetic Samples. *Analytica*. 2023. Vol. 4. P. 447–455. **6.** ДСТУ EN ISO 14911:2022 (EN ISO 14911:1999, IDT; ISO 14911:1998, IDT). Якість води. Визначення розчиненого Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} і Ba^{2+} за допомогою іонної хроматографії. Метод для води та стічних вод. [Чинний від 2022-12-28]. № 285; [Чинний від 2023-04-13]. № 64. 21 с. URL: <http://katalog.uas.org.ua/> (дата звернення: 08.04.2024). **7.** ДСТУ EN ISO 10304-1:2022 (EN ISO 10304-1:2009, IDT; ISO 10304-1:2007, IDT) / Поправка № 1:2022 (EN ISO 10304-1:2009/AC:2012, IDT; ISO 10304-1:2007 / Cor 1:2010, IDT). Якість води. Визначення розчинених аніонів методом рідинної іонної хроматографії. Частина 1: Визначення бромиду, хлориду, фтору, нітрату, нітриту, фосфату та сульфату. [Чинний від 2022-12-28]. № 285; [Чинний від 2023-04-13]. № 64, 23 с. URL: <http://katalog.uas.org.ua/> (дата звернення: 08.04.2024). **8.** Програмне забезпечення AGREE. URL: <https://mostwiedzy.pl/AGREE> (дата звернення: 08.04.2024). **9.** Kannaiah K. P., Chanduluru H. K. Exploring sustainable analytical techniques using G score and future innovations in green analytical chemistry. *Journal of Cleaner Production*. 2023. P. 139297. **10.** Cetinkaya A., Kaya S. I., Ozkan S. A. An overview of the current progress in green analytical chemistry by evaluating recent studies using greenness assessment tools. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2023. Vol. 168. P. 117330. **11.** Alahmad W., Kraiya C., Varanusupakul P., Tabani H. et al. Gel electromembrane microextraction followed by ion chromatography for direct determination of iodine in supplements and fortified food samples: Green chemistry for food analysis. *Food Chemistry*. 2021. Vol. 358. P. 129857. **12.** D'Amore T., Di Taranto A., Berardi G., Vita V., et al. Going Green In Food Analysis: A Rapid And Accurate Method For The Determination Of Sorbic Acid And Benzoic Acid In Foods By Capillary Ion Chromatography With Conductivity Detection. *LWT*. 2021. P. 110841. **13.** Michalski R., Pecyna-Utylska P. Green Aspects of Ion Chromatography versus Other Methods in the Analysis of Common Inorganic Ions. *Separations*. 2021. Vol. 8, no. 12. P. 235. URL: <https://doi.org/10.3390/separations8120235> (accessed: 18.05.2024). **14.** Pena-Pereira F., Wojnowski W., Tobiszewski M. AGREE – Analytical GREENness metric approach and software. *Analytical Chemistry* 2020. Vol. 92, no 14. P. 10076–10082. **15.** Armenta S., Garrigues S., Guardia M., Green Analytical Chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2008. Vol. 27, no. 6. P. 497–511. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2008.05.003>. (дата звернення: 05.05.2024). **16.** Gros N., Gorenc B. Performance of ion chromatography in the determination of anions and cations in various natural waters with elevated mineralization. *Journal of Chromatography A*. 1997. Vol. 770, no. 1–2. P. 119–124. **17.** Yu L., Zheng T., Yuan R., Zheng X. APCS-MLR model: A convenient and fast method for quantitative identification of nitrate pollution sources in groundwater. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 314, no. 4797.

18. MBV 081/12-0653-09. Поверхневі, підземні та зворотні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації хлоридів титриметричним методом : затв. та надано чинності Наказом Міністра охорони навколишнього природного середовища України від 21 червня 2005 р. № 219. URL: <https://online.budstandart.com/> (дата звернення: 08.04.2024). **19.** MBV 081/12-0177-05. Поверхневі та очищені стічні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації сульфатів титриметричним методом : затв. та надано чинності Наказом Міністра охорони навколишнього природного середовища України від 21 червня 2005 р. № 219. URL: <https://online.budstandart.com/> (дата звернення: 08.04.2024). **20.** ДСТУ ISO 9964-3:2015. Визначення вмісту натрію та калію методом атомно-емісійної спектроскопії з поглинанням (ISO 9964-3:1993, IDT) : наказ від 21.12.2015 р. № 198. URL: <https://online.budstandart.com/> (дата звернення: 08.04.2024). **21.** MBV 081/12-0006-01. Поверхневі та очищені стічні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації кальцію та магнію титриметричним методом : затв. наказом Міністерства екології та природних ресурсів України від 03.09.2002 р. № 336. URL: <https://online.budstandart.com/> (дата звернення: 08.04.2024).

REFERENCES:

1. Shi M., Zheng X., Zhang N., Guo Y. et al. Overview of sixteen green analytical chemistry metrics for evaluation of the greenness of analytical methods. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2023. P. 117211. **2.** Armenta S., Garrigues S., Guardia M. The role of green extraction techniques in Green Analytical Chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2015. Vol. 71. P. 2–8. **3.** Tobiszewski M.; Marc M.; Gatuszka A.; Namiesnik J. Green Chemistry Metrics with Special Reference to Green Analytical Chemistry. *Molecules*. 2015. Vol. 20. P. 10928–10946. **4.** Biedunkova O. O., Kuznietsov P. V. Metodolohiia zastosuvannya korektsiinoi obrobky biotsydamy system tekhnichnoho vodopostachannia elektrostantsii. *Visnyk NUVHP. Silskohospodarski nauky*: zb. nauk. prats. Rivne : NUVHP, 2023. Vyp. 2(102). S. 3–15. URL: <https://doi.org/10.31713/vs220231> (data zvernennia: 05.05.2024). **5.** Wejnerowska G., Narloch I. Comparison of the Greenness Assessment of Chromatographic Methods Used for Analysis of UV Filters in Cosmetic Samples. *Analytica*. 2023. Vol. 4. P. 447–455. **6.** DSTU EN ISO 14911:2022 (EN ISO 14911:1999, IDT; ISO 14911:1998, IDT). Yakist vody. Vyznachennia rozchynenoho Li⁺, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mn²⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Sr²⁺ i Ba²⁺ za dopomohoiu ionnoi khromatohrafii. Metod dlia vody ta stichnykh vod. [Chynnyi vid 2022-12-28]. № 285; [Chynnyi vid 2023-04-13]. № 64. 21 s. URL: <http://katalog.uas.org.ua/> (data zvernennia: 08.04.2024). **7.** DSTU EN ISO 10304-1:2022 (EN ISO 10304-1:2009,

IDT; ISO 10304-1:2007, IDT) / Popravka № 1:2022 (EN ISO 10304-1:2009/AC:2012, IDT; ISO 10304-1:2007 / Cor 1:2010, IDT). Yakist vody. Vyznachennia rozchynenykh anioniv metodom ridynnoi ionnoi khromatohrafi. Chastyna 1: Vyznachennia bromidu, khlorody, ftoru, nitratu, nitrytu, fosfatu ta sulfatu. [Chynnyi vid 2022-12-28]. № 285; [Chynnyi vid 2023-04-13]. № 64, 23 s. URL: <http://katalog.uas.org.ua/> (data zvernennia: 08.04.2024). **8.** Prohamne zabezpechennia AGREE. URL: <https://mostwiedzy.pl/AGREE> (data zvernennia: 08.04.2024). **9.** Kannaiyah K. P., Chanduluru H. K. Exploring sustainable analytical techniques using G score and future innovations in green analytical chemistry. *Journal of Cleaner Production*. 2023. P. 139297. **10.** Cetinkaya A., Kaya S. I., Ozkan S. A. An overview of the current progress in green analytical chemistry by evaluating recent studies using greenness assessment tools. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2023. Vol. 168. P. 117330. **11.** Alahmad W., Kraiya C., Varanusupakul P., Tabani H. et al. Gel electromembrane microextraction followed by ion chromatography for direct determination of iodine in supplements and fortified food samples: Green chemistry for food analysis. *Food Chemistry*. 2021. Vol. 358. P. 129857. **12.** D'Amore T., Di Taranto A., Berardi G., Vita V., et al. Going Green In Food Analysis: A Rapid And Accurate Method For The Determination Of Sorbic Acid And Benzoic Acid In Foods By Capillary Ion Chromatography With Conductivity Detection. *LWT*. 2021. P. 110841. **13.** Michalski R., Pecyna-Utylska P. Green Aspects of Ion Chromatography versus Other Methods in the Analysis of Common Inorganic Ions. *Separations*. 2021. Vol. 8, no. 12. P. 235. URL: <https://doi.org/10.3390/separations8120235> (accessed: 18.05.2024). **14.** Pena-Pereira F., Wojnowski W., Tobiszewski M. AGREE – Analytical GREENness metric approach and software. *Analytical Chemistry* 2020. Vol. 92, no 14. P. 10076–10082. **15.** Armenta S., Garrigues S., Guardia M., Green Analytical Chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2008. Vol. 27, no. 6. P. 497–511. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2008.05.003>. (data zvernennia: 05.05.2024). **16.** Gros N., Gorenc B. Performance of ion chromatography in the determination of anions and cations in various natural waters with elevated mineralization. *Journal of Chromatography A*. 1997. Vol. 770, no. 1–2. P. 119–124. **17.** Yu L., Zheng T., Yuan R., Zheng X. APCS-MLR model: A convenient and fast method for quantitative identification of nitrate pollution sources in groundwater. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 314, no. 4797. **18.** MVV 081/12-0653-09. Poverkhnevi, pidzemni ta zvorotni vody. Metodyka vykonannia vymiriuvan masovoi kontsentratsii khlorodyv tytrymetrychnym metodom : zatv. ta nadano chynnosti Nakazom Ministra okhorony navkolishnoho pryrodnoho seredovyscha Ukrainy vid 21 chervnia 2005 r. № 219. URL: <https://online.budstandart.com/> (data zvernennia: 08.04.2024). **19.** MVV 081/12-0177-05. Poverkhnevi ta ochyshcheni stichni vody. Metodyka vykonannia vymiriuvan masovoi kontsentratsii sulfativ

tytrymetrychnym metodom : zatv. ta nadano chynnosti Nakazom Ministra okhorony navkolynshnoho pryrodnoho seredovyshcha Ukrainy vid 21 chervnia 2005 r. № 219. URL: <https://online.budstandart.com/> (data zvernennia: 08.04.2024). **20.** DSTU ISO 9964-3:2015. Vyznachennia vmistu natriiu ta kaliuu metodom atomno-emisiinoi spektrometrii z polumenevym zbudzhenniam (ISO 9964-3:1993, IDT) : nakaz vid 21.12.2015 r. № 198. URL: <https://online.budstandart.com/> (data zvernennia: 08.04.2024). **21.** MVV 081/12-0006-01. Poverkhnevi ta ochyshcheni stichni vody. Metodyka vykonannia vymiriuvan masovoi kontsentratsii kaltsiiu ta mahniiu tytrometrychnym metodom : zatv. nakazom Ministerstva ekolohii ta pryrodnykh resursiv Ukrainy vid 03.09.2002 r. № 336. URL: <https://online.budstandart.com/> (data zvernennia: 08.04.2024).

Biedunkova O. O., Doctor of Biological Sciences, Professor;
Kuznietsov P. M., Post-graduate Student (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF ANALYTICAL METHODS FOR MEASURING THE MACROCOMPONENT COMPOSITION OF SURFACE WATERS

In modern analytical laboratories, several methods may be used to determine a single indicator. Metrological characteristics, cost of analysis and specific standard procedures recommended for environmental, health or other purposes are taken into account when selecting analytical methods, but little or no consideration is given to the environmental friendliness of the methods and procedures. Ion chromatography (IC) is a multi-component, rapid analytical method that allows accurate measurement of ion concentrations. The aim of the study is to compare the environmental friendliness of analytical procedures for measuring the concentration of the macro-component chemical composition of surface waters for SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} ions: IC and titrimetric methods and Na^+ and K^+ : IX and flame photometry methods using the AGREE software. IC procedures demonstrated higher analytical greenness scores compared to standard methods used in Ukraine, particularly for anion determination (score 0.82) due to the use of sodium bicarbonate as an eluent, in contrast to the methylsulfonic acid used for cations. Flame photometry for Na^+ and K^+ achieved the highest greenness



score among standard methods (0.58) due to the absence of chemical reagents, despite using a potentially hazardous propane-butane gas mixture. The lowest scores were observed for titrimetric methods for SO_4^{2-} (0.38) and Cl^- (0.48), primarily due to the use of toxic substances like barium and chromates. Mg^{2+} and Ca^{2+} titrimetric methods had a score of 0.51, which was significantly lower than IC procedures. The evaluation of the methods for measuring the concentration of the macro-component chemical composition of surface waters shows that the choice of IC for measurement is appropriate from an environmental point of view.

Keywords: analytical greenness; green analytical chemistry; macrocomponent composition; surface water; ion chromatography.