

## РОЗВИТОК ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ ХІМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ АЕС ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ВІДПОВІДНОСТІ МІЖНАРОДНИМ СТАНДАРТАМ

Яцишин А. В.<sup>1</sup>, Ковач В. О.<sup>1</sup>, Кубрак Ю. О.<sup>2</sup>,  
Левченко А. Ю.<sup>2</sup>, Коваленко О. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Центр інформаційно-аналітичного та технічного  
забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України,  
03142, м. Київ, пр. Академіка Палладіна, 34а,

<sup>2</sup>Державний університет «Житомирська політехніка»,  
10005, Україна, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103,  
*iatsyshyn.andriy@gmail.com*

У статті розглянуто актуальні проблеми та напрями розвитку інтегрованих інформаційно-аналітичних систем хімічного моніторингу атомних електростанцій як важливого інструменту підвищення екологічної безпеки та забезпечення відповідності міжнародним стандартам. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до моніторингу впливу АЕС на довкілля, що поєднує контроль радіаційних і хімічних факторів техногенного навантаження, з урахуванням сучасних вимог МАГАТЕ, нормативів Європейського Союзу та національного законодавства.

Проаналізовано міжнародну та національну нормативно-правову базу у галузі екологічного моніторингу АЕС, визначено ключові вимоги до систем контролю викидів і скидів, водно-хімічного режиму та екологічної інформаційної прозорості. Розглянуто концепцію побудови інтегрованої інформаційно-аналітичної системи хімічного моніторингу, що охоплює етапи аналізу вимог, проектування архітектури, розробки програмного забезпечення, впровадження, введення в експлуатацію та подальшого супроводу системи.

Особливу увагу приділено сучасним технологічним рішенням у сфері автоматизованого хімічного контролю, зокрема використанню онлайн-аналізаторів, проточних методів аналізу, дистанційних постів спостереження, геоінформаційних систем та елементів інтелектуального аналізу даних.

Узагальнено зарубіжний досвід впровадження інтегрованих систем моніторингу на АЕС та показано їх ефективність у своєчасному виявленні відхилень, підтримці водно-хімічного режиму і зниженні екологічних ризиків.

Зроблено висновок, що розвиток інтегрованих інформаційно-аналітичних систем хімічного моніторингу є необхідною умовою підвищення рівня екологічної безпеки АЕС, гармонізації національних підходів з міжнародними стандартами та забезпечення сталого розвитку ядерної енергетики.

**Ключові слова:** атомна електростанція, хімічний моніторинг, інформаційно-аналітична система, екологічна безпека, міжнародні стандарти, МАГАТЕ.

# DEVELOPMENT OF INTEGRATED CHEMICAL MONITORING SYSTEMS FOR NPPS AS A TOOL FOR IMPROVING THE LEVEL OF ENVIRONMENTAL SAFETY AND COMPLIANCE WITH INTERNATIONAL STANDARDS

Iatsyshyn Andrii<sup>1</sup>, Kovach Valeriia<sup>1</sup>, Kubrak Yurii<sup>2</sup>,  
Levchenko Anton<sup>2</sup>, Kovalenko Oleksandr<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Center for Information-analytical and Technical Support of Nuclear Power Facilities Monitoring of the NAS of Ukraine, 34a Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine

<sup>2</sup>Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivsyka Str., Zhytomyr, 10005, Ukraine

The article considers current problems and directions for the development of integrated information and analytical systems for chemical monitoring of nuclear power plants as an important tool for improving environmental safety and ensuring compliance with international standards. The need for a comprehensive approach to monitoring the impact of nuclear power plants on the environment, which combines control of radiation and chemical factors of technogenic load, taking into account modern IAEA requirements, European Union regulations and national legislation, is substantiated.

The international and national regulatory framework in the field of environmental monitoring of nuclear power plants is analyzed, key requirements for emission and discharge control systems, water-chemical regime and environmental information transparency are determined. The concept of building an integrated information and analytical system for chemical monitoring is considered, which includes the stages of requirements analysis, architecture design, software development, implementation, commissioning and further system maintenance.

Particular attention is paid to modern technological solutions in the field of automated chemical control, in particular the use of online analyzers, flow analysis methods, remote observation posts, geo-

graphic information systems and elements of intelligent data analysis. Foreign experience in implementing integrated monitoring systems at nuclear power plants is summarized and their effectiveness in timely detection of deviations, maintenance of the water-chemical regime and reduction of environmental risks is shown.

It is concluded that the development of integrated information and analytical systems of chemical monitoring is a necessary condition for increasing the level of environmental safety of nuclear power plants, harmonizing national approaches with international standards and ensuring sustainable development of nuclear energy.

**Keywords:** nuclear power plant, chemical monitoring, information and analytical system, environmental safety, international standards, IAEA.

## Актуальність дослідження

Атомні електростанції (АЕС) характеризуються низьким рівнем викидів парникових газів і є важливим джерелом енергетичних ресурсів, однак їх експлуатація супроводжується впливом на навколишнє природне середовище [1, 2]. Окрім радіаційних факторів, існують хімічні чинники техногенного впливу: теплове забруднення

водою охолоджувачами, скиди очищених технологічних вод із залишковим вмістом реагентів, роботи дизель-генераторів, поводження з відходами тощо. Для забезпечення екологічної безпеки та відповідності нормативним вимогам необхідно здійснювати комплексний моніторинг довкілля навколо АЕС – як радіаційний, так і хімічний. Особливо актуальним є створення інтегрованих інформаційно-аналітичних систем (ІАС) такого моніторингу, що дають змогу оперативно збирати й аналізувати дані про стан довкілля та про водно-хімічні процеси на станції, своєчасно виявляти відхилення і приймати управлінські рішення для захисту довкілля.

Актуальність дослідження зумовлена кількома чинниками. По-перше, сучасні вимоги до ядерної та радіаційної безпеки передбачають дотримання не лише дозових лімітів опромінення населення, але й контроль нерадіаційних впливів АЕС на навколишнє середовище. Міжнародні стандарти (МАГАТЕ, ЄС) наголошують на принципах сталого розвитку, що включають мінімізацію хімічного забруднення і раціональне використання водних ресурсів при експлуатації АЕС. По-друге, розвиток інформаційних технологій (ІоТ-сенсори, бездротові мережі, хмарні платформи, системи підтримки рішень) відкриває нові можливості для автоматизації моніторингу і обробки даних у режимі реального часу. Це дозволяє перейти від розрізнених вимірювань до інтегрованих систем екологічного нагляду, що охоплюють широкий спектр показників. По-третє, для України актуальним є завдання гармонізації стандартів екологічного моніторингу з міжнародними, зокрема з нормами Євросоюзу, у контексті євроінтеграції та виконання міжнародних зобов'язань.

Незважаючи на значний прогрес у сфері контролю викидів і скидів АЕС (за нормальної експлуатації вплив на довкілля є дуже малим і часто знаходиться на рівні фонових значень), все ще існують невирішені проблеми. До них належать: відсутність уніфікованих підходів до інтеграції даних від різних підсистем (радіаційний моніторинг, гідрохімічний контроль, метеоспостереження тощо); недостатня автоматизація контролю окремих хімічних забрудників (важкі метали, органічні сполуки) – аналіз яких досі потребує ручного відбору проб і лабораторних методів; необхідність модернізації нормативної

бази з урахуванням сучасних технічних можливостей моніторингу; забезпечення інформаційного обміну і прозорості даних для громадськості згідно з міжнародними принципами [3, 4].

Таким чином, розвиток інтегрованих ІАС хімічного моніторингу АЕС визначається поєднанням посилення регуляторних вимог, необхідністю мінімізації екологічних ризиків та впровадженням сучасних цифрових технологій. ІАС хімічного моніторингу забезпечують системне об'єднання даних із різномірних джерел (автоматизовані пости контролю, лабораторні аналізи, метеоспостереження, підсистеми водно-хімічного режиму), їх оперативну верифікацію, аналітичну обробку та підтримку прийняття управлінських рішень у штатних і позаштатних режимах роботи АЕС. Водночас, формування таких систем потребує науково обґрунтованого підходу до вибору контрольованих параметрів, стандартизації форматів і протоколів даних, забезпечення надійності та кіберзахисту, а також узгодження національних регуляторних вимог із рекомендаціями МАГАТЕ та нормами ЄС.

Метою статті є обґрунтування необхідності розвитку та впровадження інтегрованих інформаційно-аналітичних систем хімічного моніторингу атомних електростанцій, а також визначення концептуальних підходів, етапів побудови й сучасних технологічних рішень для підвищення рівня екологічної безпеки та забезпечення відповідності національних систем моніторингу міжнародним стандартам МАГАТЕ та Європейського Союзу.

## **Викладення основного матеріалу**

### ***Нормативне забезпечення та міжнародні стандарти***

Нормативно-правова база відіграє ключову роль у визначенні вимог до моніторингу довкілля на АЕС. У світі існує ієрархія таких вимог: глобальні стандарти МАГАТЕ, регіональні директиви (наприклад, Євратом в ЄС), національні закони і правила, локальні регламенти експлуатуючих організацій. В ідеалі, інтегровані системи моніторингу мають бути розроблені з урахуванням усіх цих рівнів, щоб забезпечити гармонізацію стандартів.

На міжнародному рівні ключову роль відіграють вимоги МАГАТЕ щодо контролю викидів і скидів, а також організації моніторингу навколишнього середовища [5]. Зокрема, МАГАТЕ зобов'язує операторів АЕС здійснювати радіаційно-екологічний моніторинг з метою захисту населення і довкілля, підтримувати викиди «якнайнижчими, практично досяжними» (ALARA) та регулярно звітувати регулятору [6]. Хоча акцент робиться на радіоактивних речовинах, зазначається, що необхідно враховувати також хімічні та фізичні характеристики цих речовин і середовища при оцінці їх впливу [7]. В посібнику МАГАТЕ наведено рекомендації щодо побудови програм моніторингу для ядерних установок з урахуванням всіх шляхів впливу на населення і довкілля [8]. Також МАГАТЕ приділяє увагу готовності до аварій – існують стандарти, які вимагають створення систем раннього оповіщення та моніторингових мереж на випадок радіаційних аварій (наприклад, міжнародна система IRMIS для обміну даними між країнами). Ці вимоги теж слід інтегрувати в інформаційну систему АЕС, щоб у разі надзвичайних ситуацій дані хімічного і радіаційного моніторингу оперативно передавалися відповідним органам.

На рівні Європейського Союзу застосовують-

ся нормативи, гармонізовані з підходами МАГАТЕ, але в багатьох випадках більш суворі щодо екологічних аспектів. Директива 2013/59/Euratom встановлює обов'язок держав-членів забезпечити моніторинг радіоактивних викидів і доз для населення, що спонукає операторів АЕС мати системи контролю середовища. Поза радіаційною безпекою, екологічне законодавство ЄС (Водна рамкова директива, Директива про промислові викиди тощо) регламентує якість води та повітря і містить вимоги до моніторингу забруднень. Наприклад, кожна АЕС повинна отримати дозвіл на спеціальне водокористування та скиди, де встановлено гранично допустимі концентрації хімічних речовин у стічних водах. Для контролю цього потрібні автоматичні або регулярні вимірювання рН, температури, завислих речовин, хімічного споживання кисню (ХСК), нафтопродуктів, важких металів тощо у місцях скидів і у водоймі, що приймає ці скиди. Вимоги щодо безперервного моніторингу певних параметрів дедалі посилюються. Показовим є випадок Туреччини: після оновлення природоохоронного законодавства, для нової АЕС «Аккую» було зроблено обов'язковим встановлення системи безперервного дистанційного контролю охолоджувальних вод, що скидаються в море [9]. Ця система в режимі ре-



Рисунок 1. Будівництво АЕС «Аккую» (Туреччина), на якій впроваджується автоматизована система безперервного моніторингу хімічних показників охолоджувальної води, що скидається в море [9]

ального часу відстежує прозорість, витрату води, концентрацію завислих речовин, розчинений кисень, рН, ХСК, температуру, електропровідність та інші показники відповідно до турецьких норм. Таким чином, нормативні вимоги виступили визначальним чинником упровадження інноваційної системи моніторингу, здатної функціонувати протягом усього життєвого циклу станції та оперативно сигналізувати про будь-які перевищення допустимих рівнів у скидах.

На національному рівні кожна країна-оператор АЕС має власні нормативні акти, що регулюють моніторинг. В Україні, наприклад, діють закони «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про охорону навколишнього природного середовища» та підзаконні акти, що зобов'язують Енергоатом здійснювати державний моніторинг в санітарно-захисній зоні (СЗЗ) і зоні спостереження АЕС. Регулятор (Державна інспекція ядерного регулювання України) встановлює нормативи допустимих викидів/скидів і контролює виконання. Існують також галузеві нормативні документи, наприклад, стандарти на водно-хімічний режим (ВХР) енергоблоків, що визначають норми вмісту корозійно-агресивних домішок у теплоносій (хлориди, сульфати, розчинений кисень тощо) і відповідні методи контролю. Багато з цих документів розроблені ще за часів СРСР або раніше й наразі переглядаються з урахуванням рекомендацій МАГАТЕ та досвіду ЄС. Зокрема, Україна взяла курс на впровадження інтегрованих систем менеджменту на АЕС, сертифікованих за міжнародними стандартами ISO 14001 (екологічне управління) та ISO 9001 (якість). Це передбачає створення єдиної інформаційної платформи, де відслідковуються показники, пов'язані з безпекою, охороною довкілля, якістю, охороною праці тощо.

Отже, нормативне поле формує вимоги та стимулює розвиток систем моніторингу. Гармонізація стандартів означає приведення національних норм у відповідність до кращих міжнародних практик. Для інтегрованих ІАС хімічного моніторингу це означає, що система має забезпечувати збір даних для виконання вимог наглядових органів (радіаційного і природоохоронного), а також відповідати рекомендаціям МАГАТЕ щодо структури та якості моніторингу. Зокрема, дані моніторингу повинні бути достовірними, опера-

тивними, відкритими для контролюючих органів і громадськості (у межах, не розкриваючих чутливої інформації), а також зберігатися протягом усього життєвого циклу станції для аналізу трендів і обґрунтування безпеки.

### ***Концепція розвитку інтегрованої системи моніторингу (етапи побудови)***

Інтегрована ІАС хімічного моніторингу АЕС – це сукупність технічних і програмних засобів, об'єднаних у єдину інфраструктуру, що забезпечує автоматизований збір, передачу, зберігання, аналіз та представлення даних про хімічні та радіаційно-хімічні показники стану довкілля і технологічних середовищ АЕС. Розробка такої системи є комплексним завданням, яке можна умовно розбити на кілька етапів:

1. *Аналіз вимог та планування.* На цьому етапі визначаються цілі моніторингової системи (охорона довкілля, ядерна безпека, підтримка технологічних режимів), перелік параметрів для контролю та частота вимірювань, виходячи з нормативних вимог і внутрішніх потреб експлуатації. Наприклад, для довкілля зазвичай контролюють: викиди в атмосферу (об'ємні активності аерозолів, газів; концентрації хімічних речовин, якщо є значущі джерела), скиди у водойми (радіонукліди, рН, температура, солоність, завислі речовини, ХСК, йони металів тощо), стан ґрунтів, біоти (вміст радіонуклідів і забрудників у пробах). Всередині станції – параметри водно-хімічного режиму першого і другого контурів (концентрація бору, кислотно-лужні властивості, розчинений кисень, концентрація корозійно-активних солей, радіоактивність води тощо). Також визначається географія системи: мережа постів в СЗЗ і зоні спостереження, точки відбору проб, підключення до технологічних контурів. На основі цього складається технічне завдання на проектування системи.

2. *Проектування архітектури системи.* Розробляється структура ІАС, що зазвичай має трирівневу ієрархію: первинні вимірювальні пристрої (датчики, аналізатори, пробовідбірники) – середовище передачі даних (кабельні або бездротові мережі, протоколи зв'язку) – центральний інформаційно-аналітичний центр (сервери збору даних, бази даних, програмне забезпечення для

аналізу). На цьому етапі обираються конкретні технологічні рішення: типи датчиків (наприклад, рН-метри, кисневі зонди, хроматографічні аналізатори), логери і контролери, спосіб передачі сигналу (промислові стандарти OPC, Modbus, бездротові мережі для віддалених постів тощо). Враховуються питання надійності (резервування каналів, дублювання критичних датчиків), кібербезпеки (захист від несанкціонованого доступу до даних) та сумісності з існуючими системами АЕС (наприклад, інтеграція з автоматизованою системою контролю радіаційної обстановки – АСКРО, чи з системою управління блоком).

3. *Розробка програмного забезпечення та бази даних.* На верхньому рівні ІАС створюється програмний комплекс, який забезпечує збір, обробку, зберігання та відображення інформації. Таке ПЗ виконує кілька важливих функцій (рис. 2): а) агрегація даних з різних джерел у єдиній базі (наприклад, об'єднання показань автоматичних постів контролю гамма-фону, хіманалізаторів, метеостанцій та лабораторних аналізів); б) аналіз та діагностика – програма в реальному часі порівнює отримані значення з нормативними граничними рівнями, розраховує тренди і може виявляти небажані тенденції задовго до досягнення аварійних значень; в) сповіщення персоналу – ІАС має автоматично сигналізувати черговому хіміку або екологу про вихід параметрів за допустимі межі. г) підготовка звітності – система формує необхідні звіти: щоденні оперативні зведення, щомісячні і річні звіти для керівництва та

регуляторів, включно з розрахунками статистичних показників, графіками змін концентрацій, об'ємів викидів тощо. г) підтримка лабораторії – сучасне ПЗ може включати модулі для керування роботою хімічної лабораторії: ведення електронних лабораторних журналів, протоколювання результатів аналізів, внутрішній контроль якості вимірювань (калібрування приладів, статистичний аналіз похибок). Така інтеграція лабораторного і автоматичного контролю – один з ключових принципів концепції ІАС, оскільки забезпечує цілісність інформації та усуває «розрив» між оперативними даними і детальними аналізами.

4. *Впровадження (монтаж та налагодження).* На цьому етапі здійснюється придбання і встановлення обладнання на місцях: датчики монтується у контури і на екологічних постах, прокладаються кабельні лінії чи налаштовуються радіомодулі, розгортається серверне обладнання і встановлюється програмне забезпечення. Після монтажу – тривалий процес пусконаладжувальних робіт: перевірка правильності передачі сигналів, калібрування датчиків і аналізаторів на еталонних розчинах, тестування програмних алгоритмів. Важливо також інтегрувати систему в існуючу інфраструктуру АЕС. Завершальним кроком цього етапу є дослідно-промислова експлуатація ІАС: протягом певного часу система працює паралельно зі старими методами моніторингу, щоб верифікувати її точність і надійність, внести виправлення.



Рисунок 2. Ключовий функціонал програмного комплексу ІАС (створено за допомогою онлайн-інструменту NotebookLM)

5. *Введення в експлуатацію та супровід.* Після успішних випробувань система затверджується до промислової експлуатації наказом по станції, персонал починає використовувати її в щоденній роботі. Дуже важливо організувати навчання персоналу – як інженерів-хіміків, так і екологів, операторів блочного щита, які можуть отримувати від неї сигнали. Система має працювати цілодобово, тому визначаються відповідальні особи за її технічне обслуговування (служба АСУТП чи ІТ). Супровід включає: регулярну перевірку і калібрування датчиків (щоб система давала достовірні показання), оновлення програмного забезпечення (виправлення недоліків, додавання нових функцій), резервне копіювання баз даних, кібербезпекові ревізії.

Інтегрована система моніторингу не є статичною – концепція розвитку передбачає її постійне вдосконалення. Наприклад, з часом можуть додаватися нові контрольовані параметри, нові аналітичні модулі (побудова прогнозів, моделювання поширення домішок), інтеграція з зовнішніми базами даних.

Побудова такої системи ґрунтується на принципах надійності, оперативності, точності і комплексності.

Слід зазначити, що зарубіжний досвід показує успішність поетапного впровадження. Наприклад, у Франції екологічний моніторинг АЕС виконується трьома взаємопов'язаними підсистемами: система аварійного оповіщення (on-line датчики на викидах, гамма-пости, хімічні монітори води на виході з станції), система контрольного моніторингу (регламентовані відбори проб і аналізи згідно з дозволами на скиди) і система аналітичного супроводу (глибокий аналіз проб, моделювання та прогнозування забруднюючих речовин) [10]. Інтегрована інформаційна система повинна охоплювати всі ці рівні та забезпечувати між ними обмін даними.

В Україні у зоні спостереження АЕС функціонують автоматизовані пости гамма-контролю (АСКРО), метеорологічні майданчики, здійснюється регулярний відбір проб води, ґрунту, молока, риби тощо.

Проте актуальним є завдання інтеграції цих даних у єдину систему з метою підвищення ефективності екологічного контролю та забезпечення прозорості інформації для суспільства.

## *Сучасні рішення та нові технології*

Розглянемо сучасний стан інформаційно-аналітичного забезпечення хімічного моніторингу на АЕС у світі та проаналізуємо новітні ідеї та інновації в цій галузі. Одним з трендів є впровадження автоматизованих підсистем хімічного контролю безпосередньо на енергоблоках. Сучасні реакторні установки обладнуються вбудованими системами автоматичного хімічного контролю ВХР: в ключових точках технологічних контурів встановлено датчики і аналізатори, які здійснюють безперервні або періодичні вимірювання хімічних показників (типово – рН, електропровідність, концентрація розчиненого кисню, вміст корозійно-активних аніонів хлориду та сульфату, концентрація борної кислоти у воді першого контуру, вміст розчиненого водню тощо). Дані зі стаціонарних онлайн-аналізаторів збираються в реальному часі і надходять в інформаційну систему хімічної служби блоку. Паралельно здійснюється лабораторний контроль – персонал хімлабораторії добирає проби середовищ (питна вода, вода технічна з систем охолодження, теплоносії, масла) і виконує детальні аналізи, включаючи радіохімічні (визначення тритію, стронцію-90, корозійних продуктів активації в теплоносії тощо) та хімічні (спектрометрія домішок, визначення концентрації продуктів корозії, солей) [3, 11, 12]. Для ефективного використання такої множини даних створюються спеціалізовані програмно-апаратні комплекси – інформаційно-аналітичні системи хіммоніторингу ВХР.

Компанія EDF (Франція) у своїх реакторах має систему, яка стежить за ключовими параметрами хімії теплоносія і подає сигнали операторам через інформаційну систему блоку. У США у ядерній енергетиці для моніторингу та управління хімічними параметрами первинних і вторинних контурів впроваджуються інформаційні системи обробки та інтеграції даних, що аналізують результати лабораторних аналізів і онлайн-моніторингу з метою відслідковування трендів і підтримки прийняття рішень щодо водної хімії та її контролю на АЕС. Такі технології описуються у міжнародних технічних публікаціях про системи обробки даних для водної хімії та контролю корозії на АЕС. Американський регулятор NRC вимагає мати програми контролю водно-хіміч-

ного режиму як частину планів управління старінням обладнання – адже корозія, відкладення солей у парогенераторах чи трубопроводах можуть напряму впливати на безпеку реактора. У цьому контексті автоматизація хімічного контролю сприймається як інструмент профілактики аварій, пов'язаних із деградацією матеріалів.

Окрім безпосередньо систем моніторингу, варто згадати новітні методи аналізу, що впроваджуються для підвищення ефективності хімічного контролю. Одним з таких напрямів є перехід від «ручних» методик до проточних методів аналізу (FIA – Flow Injection Analysis). Натомість проточні аналізатори дозволяють автоматизувати хімічний аналіз проб, зменшити об'єм реагентів і відходів та забезпечити безпечніші умови (оператор менше контактує з радіоактивними матеріалами). Перехід від періодичних batch-аналізів до безперервного або частого on-line аналізу дозволяє раніше помітити появу небажаних домішок. Таким чином, одним з інноваційних напрямів є впровадження в системах моніторингу сучасних аналітичних приладів – автоматичних титраторів, лазерних спектрометрів для контролю гідразину чи аміаку, проточних радіохімічних аналізаторів на основі сцинтиляційних детекторів тощо. Інший важливий технологічний тренд – використання систем дистанційного спостереження та раннього виявлення. Наприклад, для контролю довкілля навколо АЕС застосовуються автоматизовані станції, що передають дані по радіоканалу в центр. В Литві на Ігналінській АЕС (на етапі зняття з експлуатації) працює система моніторингу, де всі викиди в атмосферу контролюються автоматичними приладами одночасно на вміст радіоактивних і хімічних компонентів [13].

Новітні ІАС можуть також включати геоінформаційні системи (GIS-модулі), які відображають екологічну обстановку на електронній карті місцевості в околицях АЕС. Це наочно показує, де саме може виникнути перевищення нормативів, і дозволяє простежити просторовий розподіл забруднення (наприклад, шлейф нагрітої води у водоймі-охолоджувачі чи напрямок поширення викидів при певному вітрі). Деякі сучасні системи також інтегрують моделі розповсюдження домішок: при надходженні даних про перевищення, одразу ж запускається розрахунок прогнозу – куди поширяться забруднення через 1, 2, 6 годин

тощо, щоб можна було вчасно попередити населення.

Зі зростанням ролі штучного інтелекту з'являються пропозиції використовувати машинне навчання в аналізі екологічних даних АЕС. Алгоритми можуть навчитися розпізнавати складні закономірності – наприклад, виявляти вплив режимів роботи реактора на вміст корозійних продуктів, або прогнозувати заздалегідь сезонні коливання хімічних показників у водоймах (цвітіння води, зміни вмісту розчиненого кисню) і давати рекомендації по оптимізації роботи охолоджувальних систем. Хоча поки такі AI-рішення ще знаходяться в стадії досліджень, їх потенціал великий: від підвищення точності прогнозів до зменшення фальшивих тривог у системі (алгоритм може фільтрувати шум вимірювань і реагувати лише на статистично значущі зміни).

Таким чином, сучасні ІАС хімічного моніторингу АЕС розвиваються у напрямку більшої автоматизації, інтеграції та інтелектуалізації. Світовий досвід (Франція, США, Японія, Румунія та ін.) демонструє позитивні ефекти від впровадження таких систем: зниження впливу людського фактору, своєчасне виявлення відхилень, скорочення часу реагування на потенційні проблеми та прозору екологічну інформацію для усіх зацікавлених сторін.

## Висновок

У статті обґрунтовано, що розвиток інтегрованих інформаційно-аналітичних систем хімічного моніторингу атомних електростанцій є ключовою передумовою підвищення рівня екологічної безпеки та сталого функціонування ядерної енергетики в сучасних умовах. Показано, що ефективний екологічний контроль діяльності АЕС повинен базуватися на комплексному підході, який поєднує радіаційний і хімічний моніторинг, а також враховує технологічні, природоохоронні та інформаційні аспекти експлуатації об'єктів ядерної енергетики.

Проаналізовано міжнародні та національні нормативно-правові вимоги у сфері моніторингу довкілля на АЕС і встановлено, що сучасні рекомендації МАГАТЕ, директиви ЄС та національне законодавство орієнтовані на інтеграцію різномірних даних, підвищення автоматизації

контролю та забезпечення прозорості екологічної інформації. Визначено, що гармонізація національних підходів з міжнародними стандартами потребує впровадження єдиних інформаційних платформ, здатних підтримувати повний життєвий цикл даних моніторингу – від вимірювання до аналітичної обробки і звітності.

Запропоновано концептуальні етапи побудови інтегрованої інформаційно-аналітичної системи хімічного моніторингу АЕС, що охоплюють аналіз вимог, проєктування архітектури, розробку програмного забезпечення, впровадження, введення в експлуатацію та подальший супровід. Показано, що поетапне впровадження таких систем із забезпеченням надійності, кіберзахисту та сумісності з існуючими автоматизованими системами АЕС є оптимальним шляхом модернізації екологічного контролю.

Узагальнення світового досвіду підтвердило ефективність використання сучасних технологічних рішень, зокрема онлайн-аналізаторів, проточних методів аналізу, дистанційних постів спостереження, геоінформаційних систем і елементів інтелектуального аналізу даних. Доведено, що такі рішення сприяють своєчасному виявленню відхилень у водно-хімічному режимі та параметрах довкілля, зменшенню екологічних ризиків і підвищенню оперативності управлінських рішень у штатних і позаштатних режимах роботи АЕС.

Зроблено висновок, що впровадження інтегрованих інформаційно-аналітичних систем хімічного моніторингу є не лише технічним, а й організаційно-нормативним завданням, яке потребує координації між експлуатуючими організаціями, регуляторними органами та науковими установами. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення методів інтелектуального аналізу даних, прогнозування екологічних показників та оцінювання ефективності інтегрованих систем моніторингу з урахуванням специфіки національних АЕС і вимог міжнародних стандартів.

#### Список використаних джерел

1. Soto G.H., Martinez-Cobas X. Nuclear energy generation's impact on the CO<sub>2</sub> emissions and ecological footprint among European Union countries. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 945. 173844. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173844>
2. Попов О.О. Вплив АЕС на екологічну безпеку прилеглих територій. Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2014. Вип. 70. С. 11–20.
3. Huang Y.J., Sun X.F., Guo G.Y. et al. Review of potential online monitoring technologies for environmental tritium around nuclear power plant. *J Radioanal Nucl Chem*. 2025. Vol. 334. P. 4433–4456. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-025-10192-1>
4. Kuznietsov P.; Biedunkova O.; Pryshchepa A.; Yaroshchuk O. Evaluation of Water Quality's Influence on the Water Discharge of a Nuclear Power Plant (Non-Radiative Impact Factor). *Eng. Proc*. 2024. Vol. 67. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2024067003>
5. International Atomic Energy Agency, Publications advanced search, 2025. URL: <https://www.iaea.org/publications/search/topics/safety-standards>
6. Nuclear Regulatory Commission. Backgrounder on Environmental Monitoring at Nuclear Power Plants. 2021. URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/env-monitoring>
7. Radiation Monitoring for Protection of the Public and the Environment. DRAFT SAFETY GUIDE DS505. 2024. Vienna: International Atomic Energy Agency. URL: <https://surli.cc/ieqvga>
8. General Safety Guide No. GSG-8: Radiation Monitoring for Protection of the Public and the Environment. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2018. URL: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1781\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1781_web.pdf)
9. Akkuyu to have real-time discharge water monitoring system. 2025. URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/akkuyu-to-have-real-time-discharge-water-monitoring-system>
10. Fourth National Report on Compliance with the Joint Convention Obligations. 2011. URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/france-jointconventionnationalreport2012.pdf>
11. Metrohm AG. Online analysis of boric acid in the cooling water of pressurized water reactors. URL: <https://surli.cc/miyrjr>
12. Innovation, Advances and Developments in the Water Chemistry Monitoring of Nuclear Power Plants, Vienna: International Atomic Energy Agency. 2025. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE-2099web.pdf>
13. Decommissioning of the Ignalina NPP. Lithuania. 2025. URL: <https://surli.cc/drwojl>