

Методи порівняльного аналізу результатів оцінок радіаційних наслідків важких аварій на АЕС

- **Балашевська Юлія Володимирівна**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5162-4735>
- **Кириленко Юрій Олександрович**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3493-201X>
- **Іванов Захар Володимирович**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5558-3392>
- **Печериця Олександр Володимирович**, канд. техн. наук
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8711-0242>
- **Шевченко Ігор Анатолійович**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6102-520X>

Станом на 2022 рік більшість країн світу, які беруть участь у генерації ядерної енергії, забезпечені відповідними ресурсами і засобами проведення оперативного моделювання атмосферної дисперсії та оцінки доз опромінення в реальному часі за допомогою сучасних систем підтримки прийняття рішень та спеціальних програмних кодів. Проте, розроблення таких інструментів прогнозування припадає на різні історичні етапи розвитку комп'ютерних технологій та можливості розробників програмних продуктів у різних куточках світу, передбачає використання різних баз даних, провайдерів даних чисельного метеорологічного прогнозу, бібліотек коефіцієнтів переходу від результатів моделювання атмосферного розповсюдження до потенційних доз опромінення тощо.

Процес порівняння результатів оцінок та аналіз ефективності використання інструментів прогнозування радіаційних наслідків за допомогою бенчмаркінгу програмних засобів оцінки розділяє фундаментальну мету гармонізації розрахункового потенціалу країн, яка полягає в знаходженні консенсусу в підходах з моделювання атмосферної дисперсії та оцінки доз опромінення населення.

У цій статті пропонується огляд міжнародної практики та загальної концепції проведення бенчмаркінгу ланки моделювання від єдиного джерела викиду до результатів оцінки у вигляді концентрацій радіонуклідів та доз опромінення, а саме, обсяг параметрів бенчмаркінгу, умови його проведення, попередньої систематизації, збору та обробки результатів оцінки радіаційних наслідків, міжкодового аналізу (СТСА). У статті наведено досвід розроблення та застосування глибинного аналізу – аналізу узгоджених пар

(MPA), вперше застосованого експертами Державного підприємства «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» в межах міжнародного проєкту «Benchmarking on Assessment of Radiological Consequences» (BARCO).

Ключові слова: система підтримки прийняття рішень, бенчмаркінг, міжкодовий аналіз, аналіз узгоджених пар (MPA).

© Балашевська Ю. В, Кириленко Ю. О., Іванов З. В., Печериця О. В., Шевченко І. А., 2022

Результати оцінки наслідків важких аварій на АЕС, масштаби яких можуть досягати трансграничного характеру, слугують вагомим підґрунтям для прийняття невідкладних рішень щодо захисту населення та аналізу розвитку радіаційної обстановки. Задля пом'якшення радіаційних наслідків формуванням рекомендацій щодо прийняття невідкладних контрзаходів, прогнозування ситуації здебільшого допомагає досягти значного зниження рівнів опромінення населення, що зі свого боку дозволяє уникнути виникнення детерміністичних ефектів і суттєво знизити ризики виникнення стохастичних ефектів опромінення.

Поруч із результатами аварійного моніторингу, отриманими за допомогою постів радіаційного контролю, розташованих навколо АЕС і загалом по території країни, прогнозування радіаційних наслідків та розвитку ситуації є важливою підставою для впровадження вчасних та виправданих превентивних контрзаходів щодо захисту населення ще до надходження перших результатів радіаційного моніторингу. Для виконання таких задач у світовій практиці використовуються коди експрес-оцінки радіаційних наслідків, як-от InterRAS/RASCAL [1] та HotSpot [2]; разом, усе більше світові тренди демонструють значне розширення географії використання комплексних систем підтримки прийняття рішень (СППР) реального часу (зокрема, RODOS [3], ARGOS [4], RECASS [5] тощо) для моделювання радіаційних наслідків. Крім первинних завдань використання цих програмних комплексів – аварійного реагування – вони також застосовуються для вирішення задач аварійної готовності та планування, кількісного та якісного аналізу можливих сценаріїв розвитку радіаційних аварій. Це зумовлено, передусім, широким спектром можливостей цих програмних засобів як з погляду розрахункової потужності, так і з погляду ергономіки, зручності введення вихідних даних, отримання та аналізу результатів оцінки.

З часів Чорнобильської катастрофи чимало дослідницьких програм та проєктів виступають як міжнародні платформи для вдосконалення засобів моделювання, зокрема, проведення бенчмаркінгу з порівняння роботи інструментів прогнозування радіаційних наслідків. Бенчмаркінг

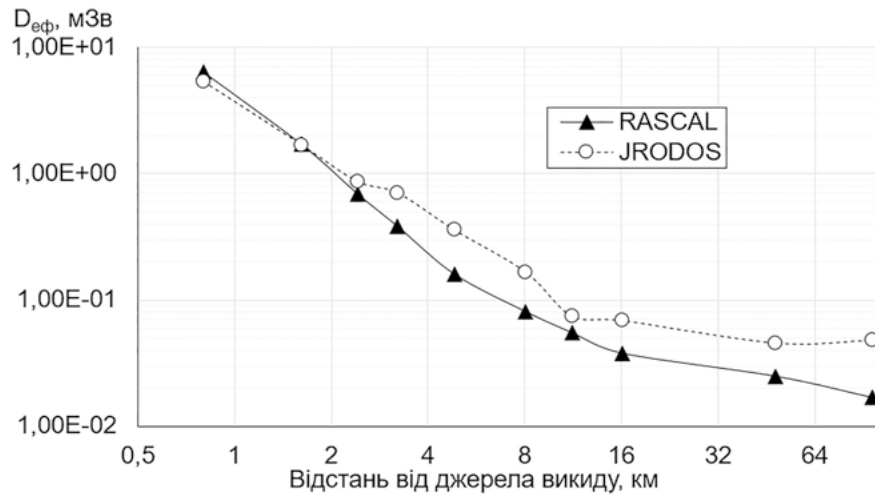
може проводитись як на основі минулих важких аварій зі значним атмосферним викидом та радіаційними наслідками, так і на базі умовних подій, які розробляються відповідно до мети дослідження.

Огляд міжнародних практик

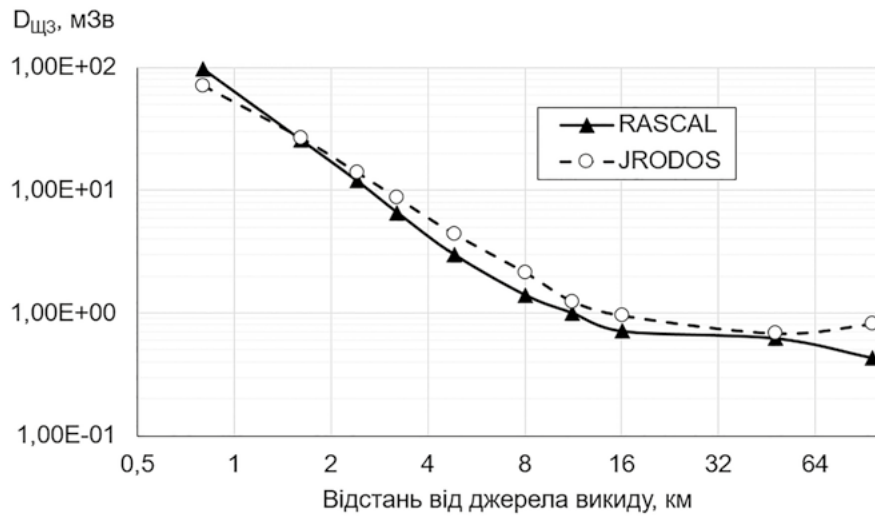
За останні 20 років значний вклад у розвиток інструментів прогнозування продовжують вносити програма регулятора США RAMP, проєкт з бенчмаркінгу «швидких» кодів FASTRUN [6] (OECD NEA), європейські проєкти CONFIDENCE [7], PREPARE [8], нішові програми H2020 R2CA [9] (IRSN), SAFIR2022 [10] (VTT). З метою висвітлення загальної картини розбіжностей результатів оцінок та гармонізації наявних підходів до оцінок радіаційних наслідків бенчмаркінг як складову вдосконалення розрахункового потенціалу можна спостерігати в межах однієї країни, наприклад, бенчмаркінгове протиаварійне тренування ASEAN NPSR [11] або навіть у межах організації.

Серед повномасштабних тренувань Міжнародного агентства з ядерної енергії (МАГАТЕ) типу ConvEx-3 можна також зустріти елементи порівняльних аналізів інструментів оцінки. Втім, у межах протиаварійних тренувань здебільшого проводиться якісне порівняння результатів розрахунку атмосферної дисперсії, а кількісні порівняння, якщо і проводяться, то для невеликого набору параметрів або незначної кількості просторових та часових рецепторів. Стандартні приклади спрощеного дослідження двох «швидких» кодів (JRODOS та RASCAL), отриманих під час проведення тренування ConvEx-3 2021, наведені на рисунку 1.

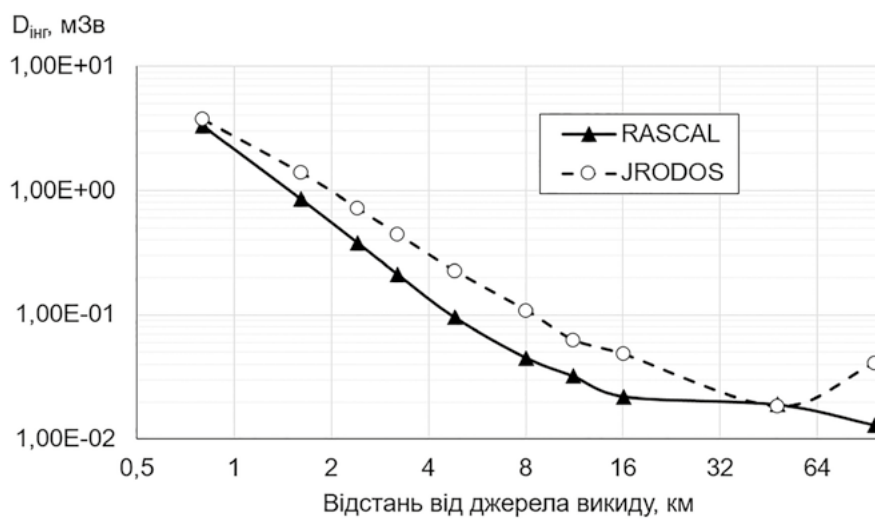
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» (ДНТЦ ЯРБ) бере участь у дослідницькому проєкті МАГАТЕ з ефективного використання програмних засобів прогнозування доз CRP J15002 [12], спільному з норвезьким регулюючим органом проєкті EXERCISE [13], європейському проєкті INSC U3.01/18 Project UK/TS/58, у межах членства в ETSON ініціював проєкт BARCO [14] та наразі продовжує продуктивну діяльність щодо дослідження можливостей інструментів прогнозування радіаційних наслідків.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Результати оцінки радіаційних наслідків парою програмних засобів (JRODOS v.2019 та RASCAL v.4.3.3) у межах повномасштабного протиаварійного тренування МАГАТЕ ConvEx-3 (2021): а) – ефективна доза, б) – еквівалентна доза на щитоподібну залозу, в) – складова ефективної дози внаслідок інгаляції

Формування пакета кодів

Пакет інструментів моделювання атмосферної та прогнозування доз опромінення може бути представленим низкою програмних продуктів та інтегрованих у них моделей, баз даних або інших допоміжних засобів. Однак, успішним проведення порівняльного аналізу результатів може бути тільки за умови використання тих кодів, які належать до регулярних технічних інструментів моделювання поширення радіоактивних речовин та оцінок доз опромінення, тобто тих, що регламентовано використовуються для вирішення завдань аварійного реагування.

Наприклад, європейська СППР JRODOS, яка використовується як основний інструмент у Інформаційно-кризовому центрі Державної інспекції ядерного регулювання (ІКЦ Держатомрегулювання), надає послідовну та вичерпну інформацію про розвиток радіологічної ситуації, її масштаби, переваги та недоліки виконуваних дій та контрзаходів. Основними користувачами JRODOS є особи, відповідальні на місцевому, регіональному, національному та міжнародному рівнях за управління надзвичайними ситуаціями за межами майданчика. JRODOS має найрізноманітнішу колекцію моделей дисперсії, як-от: гаусова puff-модель (RIMPUFF), лагранжева (DIPLOT і LASAT), ейлерова (MATCH). СППР аналогічного рівня – система ARGOS, використовується в Данії, Канаді, Ірландії, Норвегії та 3 країнах Балтії. На відміну від СППР JRODOS, остання версія системи ARGOS містить додаткові моделі DERMA (Данія) і MLDPO (Канада).

Модель FLEXPART використовується для широкого кола досліджень з перенесення різних типів аерозолів в атмосферному повітрі. Перша версія лагранжевої моделі атмосферної дисперсії FLEXible PARTicle (FLEXPART) була розроблена в середині 90-х років у Норвезькому інституті дослідження повітря (NIAR) для дослідження дальнього та мезомасштабного розсіювання аерозолів з точкових джерел, зокрема АЕС. Модель FLEXPART не розраховує значення доз опромінення населення чи інших дозоформуючих факторів. Станом на 2022 рік модель FLEXPART вбудована в Unix-версію СППР JRODOS.

Код кризового центру Комісії ядерного регулювання (КЯР, США) RASCAL використовується як інструмент побудови незалежних прогнозів доз і радіаційних наслідків під час інцидентів та надзвичайних ситуацій. На відміну від багатьох інструментів прогнозування, введення даних щодо джерела викиду в коді RASCAL можливе через опис поточного статусу та роботи систем безпеки аварійного енергоблока. У цей код інтегрована гаусова модель атмосферної дисперсії, а оцінка доз

проводиться на базі відповідних національних стандартів США. Програмний продукт використовується країнами членами програми RAMP.

Програмний продукт ARANO було розроблено Технічним дослідницьким центром Фінляндії (VTT) в 1970-х роках для проведення досліджень з вибору місця розташування майбутніх АЕС. Код використовує гаусову модель дисперсії, метеорологічні умови задаються на початку розрахунку та не змінюються в процесі його виконання. Код подібний до коду HOTSPOT, що використовується експертами ІКЦ Держатомрегулювання як допоміжний програмний продукт для перевірки та підтримки результатів моделювання, що виконуються за допомогою СППР JRODOS у цілях аварійної готовності та реагування. Останнім часом ARANO використовувався VTT для підтримки Центру радіаційної та ядерної безпеки Фінляндії (STUK) під час проведення оцінок безпеки для будівництва нових АЕС, демонтажу дослідницького реактора, а також для розрахунку майданчиків для захоронення відходів.

Код VALMA було розроблено VTT у 1990-х роках для підтримки діяльності STUK у цілях аварійної готовності та реагування. Код використовує лагранжеву модель атмосферної дисперсії. В ньому доступне як використання реальних метеорологічних умов, що надаються Фінським Метеорологічним Інститутом (додатково застосовується модель атмосферної дисперсії SILAM), так і точкових метеоданих. Код VALMA дає можливість моделювати реальні події з викидом радіоактивних аерозолів, подібно до того, як ці задачі виконує СППР JRODOS.

З огляду на суттєві відмінності в архітектурі наведених програмних засобів, які використовуються в різних країнах, відмінності у сферах їх застосування, всі вони, так чи інакше, можуть бути залучені для цілей аварійної готовності та реагування. Однак, зауважимо, що диверсифікація та розширення пакета кодів суттєво обмежує гнучкість у формуванні листа параметрів бенчмаркінгу та виборі методів аналізу результатів радіаційних наслідків, що зі свого боку може призвести до значних обсягів аналізу або проблем з підготовкою уніфікованого формату вихідних даних розрахунку. Проведення бенчмаркінгу на великій кількості кодів з одного боку дозволяє продемонструвати ширшу картину поведінки інструментів оцінки, з іншого – може призвести до поверхневого рівня аналізу з огляду на обмеження обсягів робіт у межах міжнародних проєктів.

Умови проведення бенчмаркінгу

Підходи до проведення бенчмаркінгу інструментів прогнозування радіаційних наслідків не є

фіксованими та фокусуються насамперед на результатах моделювання, яке проводиться в межах задач аварійної готовності та реагування. Під час планування бенчмаркінгу визначальними факторами є мета дослідження, обсяг порівняльних досліджень та кількість оцінюваних інструментів.

З огляду на мету дослідження обираються відповідні ланцюги моделювання, що входять до сфери інтересу. Так, наприклад, порівняння результатів моделювання атмосферної дисперсії може проводитись на базі встановленого набору вихідних даних у формі атмосферного викиду з вибором радіонуклідів-трейсерів, які представлені дозоутворюючими радіонуклідами та водночас репрезентативними з боку приналежності до фізико-хімічних груп (аерозоль, радіойод, інертні гази тощо). У такому разі обов'язковим є вибір оптимального формату метеорологічних даних, який може бути використаним усіма учасниками бенчмаркінгу. Зазвичай такі дослідження обмежуються значенням інтегральних та/або миттєвих концентрацій у повітрі, сухих та вологих випадіннях на поверхню ґрунту.

Проведення порівняльного аналізу щодо прогнозування доз опромінення охоплює більшу кількість ланцюгів моделювання та параметрів результатів. У певних випадках оцінка доз може обмежуватись результатами оцінки доз на населення згідно з критеріями впровадження невідкладних контрзаходів щодо захисту населення, в іншому – до рекомендованих зон та відстаней їх прийняття.

З метою відображення максимального потенціалу кодів оцінки потрібно також враховувати просторові обмеження моделей. У певних випадках є доцільним проведення бенчмаркінгу в декілька етапів, наприклад, за просторовою областю моделювання (короткі відстані, локальні та глобальні) з відповідним групуванням кодів за етапами.

Бенчмаркінг сучасних інструментів прогнозування може містити оцінку радіологічних наслідків умовної аварії на основі заявленого розрахункового коду, програмного комплексу або системи підтримки прийняття рішень та використання допоміжних баз даних (власні метеорологічні бази даних для обраних дати і часу початку викиду). Щоб уникнути ситуації, коли внаслідок численних ітерацій отримані дані являють собою масив з незначною дисперсією (чого не може бути під час реальної події), однією з умов бенчмаркінгу встановлюється, що всі необхідні розрахунки повинні обмежуватися наперед установленим інтервалом часу, який відповідає реальній хронології реагування на надзвичайну подію. Наприклад, це можуть бути будь-які 24 години протягом періодів, призначених для виконання розрахунків у межах одного етапу моделювання. У деяких випадках

окремо досліджується людський фактор – перевіряються можливості та навички користувачів (експертів з оцінки та прогнозування радіаційних наслідків).

Вибір переліку параметрів бенчмаркінгу

Проведення бенчмаркінгу інструментів моделювання атмосферної дисперсії та прогнозування доз передбачає використання уніфікованого формату та наповнення пакета результатів для можливості їх коректного співставлення та порівняння. Водночас, вибір переліку параметрів бенчмаркінгу суттєво залежить від вибору методів подальшого аналізу отриманих результатів. Наприклад, для проєкту BARCO було використано 18 параметрів (рисунком 2), що дозволило провести повноцінний міжкодовий аналіз (code-to-code analysis, CTCA) та аналіз узгоджених пар MPA (matched-pair analysis). Цей перелік сформовано на основі:

хронологічних аспектів конфігурації шлейфу (параметри P1, P2);

рівнів оперативного втручання EPR-NPP-OILs (2017) [15] (параметри P3 – P12);

загальних критеріїв для невідкладних захисних дій та інших дій реагування МАГАТЕ GSR Частини 7 [16] (параметри P13 – P15);

загальних критеріїв для ранніх захисних дій та інших дій реагування МАГАТЕ GSR Частини 7 [16] (параметри P16, P17);

загальних критеріїв для довгострокових медичних дій для виявлення та ефективного лікування радіаційних наслідків для здоров'я МАГАТЕ GSR Частини 7 [16] (параметр P18).

Перелік параметрів бенчмаркінгу може піддаватись модифікаціям, зважаючи на мету та умови дослідження, та/або залежно від кількості та особливостей кодів у сформованому пакеті.

Міжкодовий аналіз (CTCA)

Для успішного збору результатів учасників бенчмаркінгу доцільним є розроблення уніфікованих форм надання результатів. Збір даних супроводжувався низкою опитувань щодо особливостей використання вихідних даних, моделей, баз даних, допоміжних ресурсів, виведення результатів та проблем розрахунку.

У міжнародній практиці як перший етап порівняльного аналізу, з метою відображення відхилень та дослідження зв'язків між кодами, широко використовується техніка міжкодового аналізу (CTCA). Цей метод дослідження передбачає зображення результатів моделювання у вигляді просторових і часових розподілів параметрів бенчмаркінгу та діаграм розсіювання для кожної

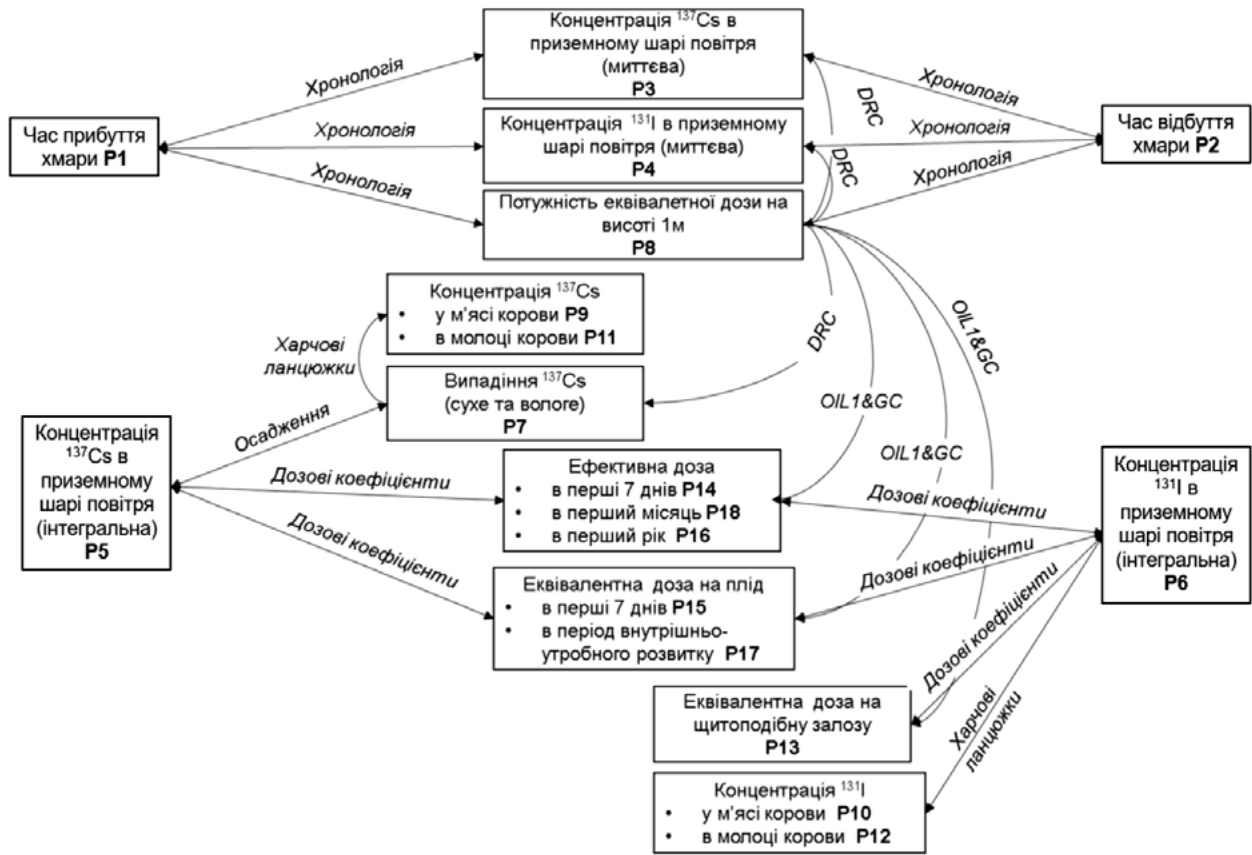


Рисунок 2 – Схема аналізу узгоджених пар (МРА)

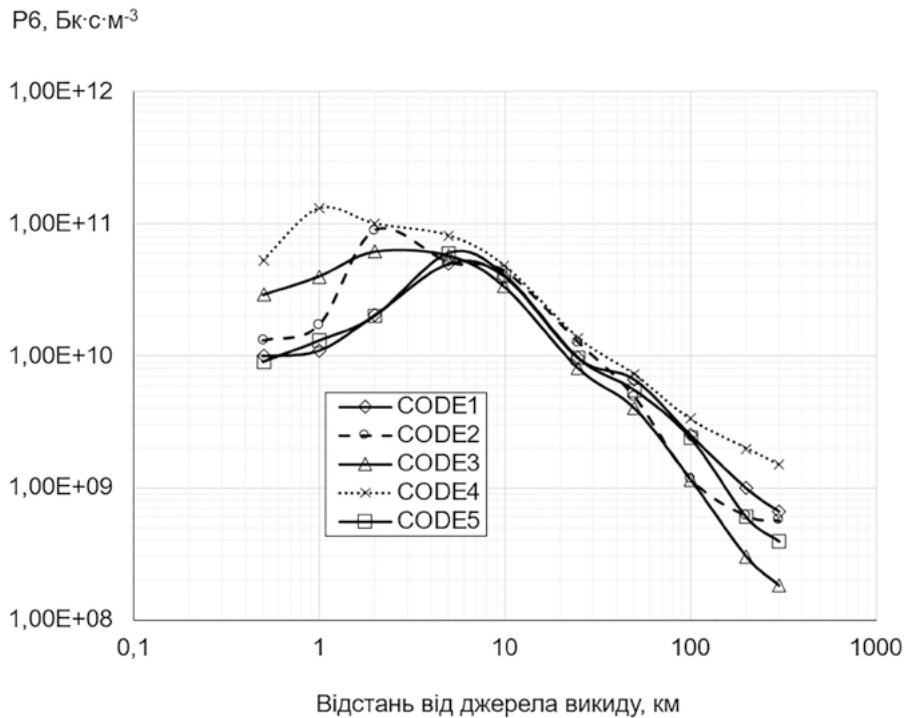


Рисунок 3 – Приклад СТС-аналізу: пряме співставлення результатів пакета з 5 кодів для параметра P6 (інтегрована за часом концентрація ^{131}I в приземному шарі повітря)

пари кодів на основі числових масивів, наданих усіма учасниками бенчмаркінгу. Зазвичай, за такого підходу відповідні результати оцінок зводяться в графічному або табульованому вигляді для кожного параметра міжкодового аналізу, як показано на рисунку 3.

Не менш важливим є дослідження співвідношення результатів різних кодів у межах одного параметра. Ця техніка є корисною для визначення груп інструментів моделювання, спільних за окремим параметром бенчмаркінгу, що дозволяє якісно охарактеризувати ступінь спорідненості кодів, провести їх групування за певними ознаками. Для цього використовується виведення результатів радіаційних наслідків у діаграму розсіювання.

Діаграма розсіювання – це тип графіка, який використовує декартові координати для відображення результатів декількох пар кодів. Точка на такій діаграмі формується співставленням результатів одного коду з іншим у межах одного параметра. На рисунку 4 наведено приклад формування діаграми розсіювання 10 пар з 5 кодів.

У результаті проведення міжкодового аналізу можна робити висновки про ступені збіжності або девіації отриманих даних за відстанню, кутом або часом.

Аналіз узгоджених пар (MPA)

З метою більш глибокого дослідження картини відхилень в отриманих результатах різних кодів може бути застосований аналіз узгоджених пар (Matched-pair analysis – MPA). Цей метод був вперше застосований у межах проєкту BARCO як ефективний механізм дослідження зв'язків дерева результатів, згідно з яким можуть спостерігатися відхилення в результатах кодів у межах вирішення завдань локального переносу та оцінки доз до сотень кілометрів. Узгоджені пари, що охоплюють усі 18 параметрів порівняльного аналізу, можуть бути пов'язані з 6 факторами, а саме:

- хронологія;
 - осадження;
 - дозові коефіцієнти переходу до потужності дози (DCF);
 - дозові коефіцієнти переходу до ефективних та еквівалентних доз;
 - харчові ланцюжки ;
 - зв'язок між рівнем оперативного втручання OIL1 (потужність гамма-доз) та загальними критеріями МАГАТЕ (доза за перший тиждень).
- Ці фактори наведені в таблиці 1 та на рисунку 2.

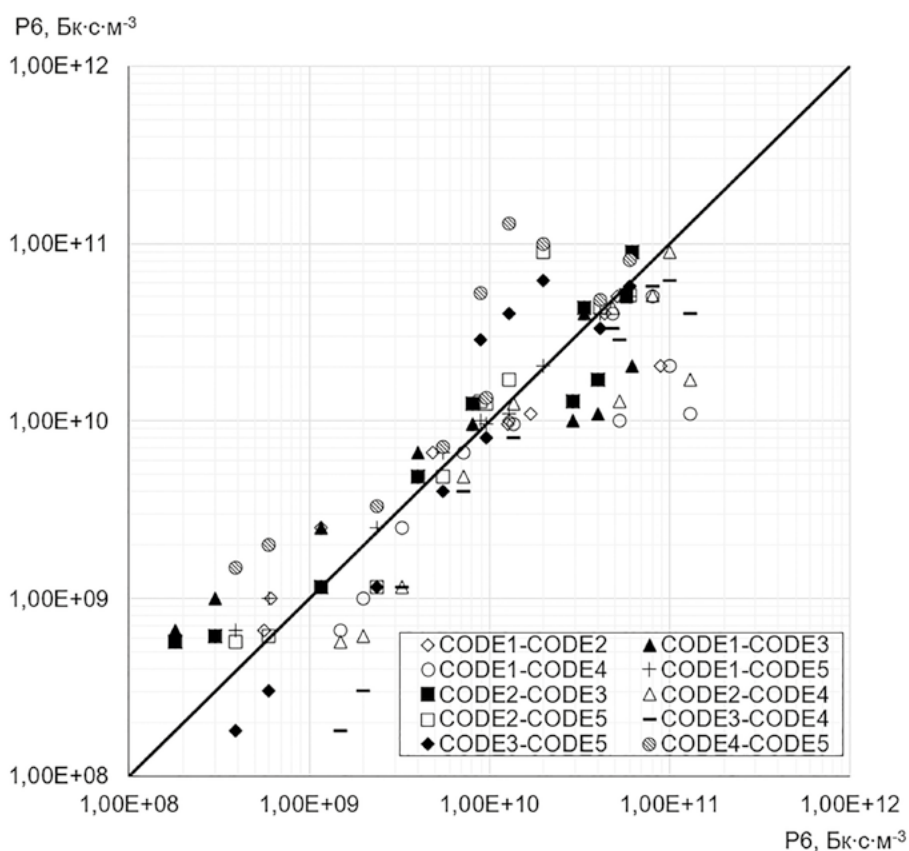


Рисунок 4 – Приклад СТС-аналізу: діаграма розсіювання для параметра P6 (інтегрована за часом концентрація ¹³¹I в приземному шарі повітря)

Таблиця 1 – Фактори зв'язку параметрів бенчмаркінгу та перелік узгоджених пар

№з/п	Фактор	Пари(а) дослідження	Контрольний рецептор
1	Хронологія	P1P3; P1P4; P1P8; P2P3; P2P4; P2P8	Значення параметра в репрезентативній точці на центральній осі проходження хмари
2	Осадження	P5P7	Розподіл параметра за відстанями та кутами (для випадку циліндричної системи координат) та після проходження хмари
3	Дозовий коефіцієнт переходу до потужності дози (dose rate conversion, DRC)	P3P8; P4P8 (від хмари та поверхні ґрунту); P7P8 (від поверхні ґрунту)	Репрезентативна точка на центральній осі проходження хмари за часом (пари P3P8; P4P8) та після проходження хмари (пара P7P8)
4	Дозовий коефіцієнт переходу до ефективної або еквівалентної дози	P5P14; P5P18; P5P16; P5P15; P5P17; P6P14; P6P16; P6P18 P6P13	Значення параметра в репрезентативній точці на центральній осі проходження хмари
5	Харчові ланцюжки	P7P9; P7P11; P6P10; P6P12	

Відношення між параметрами можна проаналізувати лише опосередковано, враховуючи їх обмежений перелік у межах бенчмаркінгу. Наприклад, зв'язок між концентрацією ^{137}Cs у приземному повітрі, інтегрованої за часом (P5) та ефективними дозами в перші 7 днів (P14) можна спостерігати побічно, оскільки інші ізотопи, що розглядаються в розрахунку, мають свій розподіл. Наведені парні кореляції можуть відображати загальну поведінку результатів учасника щодо результатів інших учасників бенчмаркінгу.

Хронологія пов'язує такі параметри руху хмари, як час прибуття (P1), час відбуття (P2) та основні миттєві параметри (концентрація ^{137}Cs та ^{131}I у приземному повітрі (P3, P4), потужність еквівалентної дози (P8). Харчовий ланцюжок об'єднує концентрацію приземного повітря (інтегровану за часом) для ^{137}Cs (P5), ^{131}I (P6) з концентраціями у м'ясі та молоці корови P9 – P12.

Процес переходу від концентрації радіонуклідів до ефективної або еквівалентної дози є прийнятним у зв'язку між інтегрованими за часом концентраціями радіонуклідів у приземному повітрі (P5), (P6) та ефективними або еквівалентними дозами (P13 – P18). Процеси осадження радіонуклідів можна охарактеризувати парою інтегрованої за часом їх концентрації у повітрі ^{137}Cs у приземному шарі повітря (P5) та поверхневим забрудненням ґрунту ^{137}Cs (P7). Перехід до потужності дози охоплює співвідношення між концентрацією ^{137}Cs та ^{131}I у приземному шарі повітря (P3, P4) та

потужністю еквівалентної дози (P8), а також поверхневим забрудненням ґрунту ^{137}Cs (P7) та потужністю еквівалентної дози (P8).

Узгоджені пари можуть бути досліджені за допомогою побудови співвідношень у контрольних рецепторах розрахунку. Наприклад, для пари P5P7 відношення P5/P7 чисельно дорівнює такій фізичній величині як швидкість осадження, розподіл якого може бути досліджений за обраними відстанями та кутами (для випадку циліндричної системи координат) під час та після проходження хмари для відповідних результатів всіх кодів, які піддаються до порівняльного аналізу.

У деяких випадках також доцільно розглянути зв'язок між потужністю еквівалентної дози (P8) із загальними критеріями МАГАТЕ GSR Частини 7 [16], та ефективними або еквівалентними дозами в різних проміжках інтегрування (P13 – P18). Вивчення таких зв'язків може слугувати контрольною перевіркою узгодженості загальних критеріїв та встановлених діючих рівнів втручання (Operational Intervention Levels, OILs).

Метод узгоджених пар може бути застосовний навіть у межах оцінки роботи одного програмного коду, що містить декілька паралельних (опціональних) моделей. Такий підхід допоможе відслідкувати етап розрахунку, на якому відбувається нарощування відхилення та невизначеності в результатах моделювання атмосферної дисперсії та/або прогнозування доз опромінення.

Висновки

Під час проведення досліджень порівняльних оцінок радіаційних наслідків важких аварій бенчмаркінг розглядається як інструмент управління якістю, спрямований на порівняльний аналіз програмних засобів моделювання атмосферної дисперсії та прогнозування доз опромінення з метою зміцнення системи готовності та реагування на надзвичайні ситуації в глобальному масштабі. Міжнародні дослідницькі проекти та програми з порівняльної діяльності сприяють відкритості та обміну сучасними підходами щодо використання пакетів моделювання та існуючих методологій.

Зважаючи на кількість кодів та обсяг пакету результатів бенчмаркінгу міжкодовий аналіз (СТСА) сумісно з аналізом узгоджених пар (МРА) можуть бути використані як ефективні та чутливі методи моніторингу загальної картини відхилень результатів оцінки радіаційних наслідків. Аналіз узгоджених пар, як методологічний підхід до порівняльного аналізу, можна застосувати навіть для аналізу одного коду, а розроблена схема може стати визначальною під час вибору параметрів бенчмаркінгу.

Запропоновані підходи до порівняльного аналізу можна розглядати як методику оцінки існуючих прогалин у моделюванні, використанні метеорологічних даних та інших баз даних учасниками бенчмаркінгу, а також підходів до інтерпретації результатів моделювання наслідків важких аварій на АЕС.

Список використаної літератури

1. Ramsdell J. V. Jr., Athey G. F., Rishelc J. P. RASCAL 4.3 User's Guide, PNNL, 2013.
2. Homann S. G., Aluzzi F. Health Physics Codes HotSpot Version 3.0 User's Guide, NARAC, LLNL, 2014.
3. JRODOS, Java-based RODOS version. Сайт СПП JRODOS. URL: <https://resy5.iket.kit.edu/JRODOS/>.
4. Hoe S., McGinnity P., Charnock T. et al. ARGOS Decision Support System for Emergency Management, 2009.
5. Shershakov V. M., Borodin R. V., Kosykh V. S. Radioecological analysis support system (RECASS). *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 50(2-4), pp. 181-184. URL: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:25036441.
6. Benchmarking of Fast-running Software Tools Used to Model Releases During Nuclear Accidents, NEA/CSNI/R(2015)19, OECD, 2015. 135 p.
7. Raskob W., Beresford N. A., Duranova T. CONFIDENCE: project description and main results. *Radioprotection*, Vol. 55, May 2020, pp. 7-15.

8. Raskob W., Schneider T., Gering F. et al. PREPARE(WP8)-(16)-03 Final Report of the PREPARE project, KIT, 2016.
9. Веб-сайт дослідницького проекту H2020 R2CA. URL: <https://r2ca-h2020.eu/>.
10. Веб-сайт дослідницького проекту SAFIR 2022. URL: <http://safir2022.vtt.fi/>.
11. Silva K., Krisanungkura P., Khunsrimek N. et al. Inter-comparison of transboundary atmospheric dispersion calculations: A summary of outputs from the ASEAN NPSR benchmark exercise, *Progress in Nuclear Energy*. Vol. 135. 2021. doi: 10.1016/j.pnucene.2021.103718.
12. Effective use of dose projection tools in the preparedness and response to nuclear and radiological emergencies. CRP J15002. URL: <https://www.iaea.org/projects/crp/j15002>.
13. Report on Ukrainian Regulatory Threat Assessment 2021, DSA, Oslo, 2022.
14. Веб-сторінка EUROSAFE 2021. URL: <https://www.etsn.eu/eurosafe>.
15. EPR-NPP-OILs (2017). Operational Intervention Levels for Reactor Emergencies and Methodology for their Derivation. Vienna: IAEA, 2017.
16. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. GSR Part 7. Vienna: IAEA, 2015.

References

1. Ramsdell J. V. Jr., Athey G. F., Rishelc J. P. (2013). RASCAL 4.3 User's Guide, PNNL.
2. Homann S. G., Aluzzi F. (2014). Health Physics Codes HotSpot Version 3.0 User's Guide, NARAC, LLNL.
3. JRODOS, Java-based RODOS version. Website JRODOSURL: <https://resy5.iket.kit.edu/JRODOS/>.
4. Hoe S., McGinnity P., Charnock T. et al. (2009). ARGOS Decision Support System for Emergency Management.
5. Radioecological analysis support system (RECASS). Retrieved from: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:25036441.
6. Benchmarking of Fast-running Software Tools Used to Model Releases During Nuclear Accidents. (2015). NEA/CSNI/R(2015)19, 135 p.
7. Raskob W., Beresford N. A., Duranova T. (2020). CONFIDENCE: project description and main results. *Radioprotection*, Vol. 55, 7-15.
8. Raskob W., Schneider T., Gering F. et al. (2016). PREPARE(WP8)-(16)-03 Final Report of the PREPARE project, KIT.
9. Website of the research project H2020 R2CA: <https://r2ca-h2020.eu/>.
10. Website of the research project SAFIR 2022: <http://safir2022.vtt.fi/>.
11. Silva K., Krisanungkura P., Khunsrimek N. et al. (2021). Inter-comparison of transboundary atmospheric dispersion calculations: A summary of outputs from the ASEAN NPSR benchmark exercise.

12. Effective use of dose projection tools in the preparedness and response to nuclear and radiological emergencies. CRP J15002. Retrieved from: <https://www.iaea.org/projects/crp/j15002>.

13. Report on Ukrainian Regulatory Threat Assessment 2021. (2022). DSA, Oslo.

14. Webpage of EUROS SAFE 2021: <https://www.etson.eu/eurosafe>.

15. EPR-NPP-OILs. (2017). Operational Intervention Levels for Reactor Emergencies and Methodology for their Derivation, IAEA, VIENNA.

16. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. GSR Part 7. (2015). International Atomic Energy Agency, Vienna.

Methods for Comparative Analysis of Modeled Radiation Consequences for Severe Accidents at Nuclear Power Plants

Yu. Balashevskaya, Yu. Kyrylenko, Z. Ivanov, O. Pecherytsa, I. Shevchenko

State Enterprise «State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation safety», Kyiv, Ukraine

As of 2022, most of the countries involved in the production of nuclear energy are provided with appropriate resources and tools for operational modelling of atmospheric dispersion and real-time dose projection using actual decision support systems and special codes. However, the development of forecasting tools at different historical stages and capabilities of software developers in different parts of the world involves the use of different databases, data providers, numerical meteorological forecast data, libraries on dose conversion factors, etc.

Activities on comparing the modelling results and analysing the effectiveness in the use of radiation forecasting tools are very relevant in the international context and share the fundamental goal of harmonizing the calculation capacity of countries through benchmarking of assessment software with various technical support organizations in the area of emergency preparedness and response.

This paper offers an overview of international practices and the general concept for benchmarking of the modelling box from a single source term to the calculation results in terms of radionuclide concentrations and projected doses. The work explicates the scope of benchmarking parameters, conditions, preliminary systematization, collection, processing of radiation consequences, and Code-to-Code Analysis (CTCA). For the first time, the paper presents experience in developing and applying in-depth analysis: matched-pair analysis (MPA) based on the SSTC NRS experience in the framework of the "Benchmarking on Assessment of Radiological Consequences" (BARCO) international project.

Keywords: decision support system, benchmarking, code-to-code analysis (CTCA), matched-pair analysis (MPA).

Отримано 13.05.2022