

Гармонізація методичних підходів та засобів прогнозування радіаційних наслідків у реальному часі

■ **Балашевська Ю. В.**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5162-4735>

■ **Кириленко Ю. О.**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3493-201X>

■ **Печериця О. В.**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8711-0242>

■ **Шевченко І. А.**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6102-520X>

■ **Богорад В. І.**

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3380-7110>

Визначення невідкладних контрзаходів щодо захисту населення в разі виникнення надзвичайної ситуації радіаційного або ядерного характеру передбачає проведення низки оцінок та прогнозів радіологічного впливу на населення на різних відстанях у реальному часі, використовуючи поточні дані метеопрогнозу та інформацію щодо характеристик джерела викиду. Ця практика реалізується під час функціонування кризових центрів у всьому світі з метою оперативного повідомлення про виникнення радіаційних аварій на території країни, а також за її межами у разі можливості транскордонного перенесення радіоактивних речовин.

Досвід експертів з оцінки та прогнозування радіаційних наслідків від країни до країни може дещо варіюватися в частині методичних підходів, використання моделей атмосферного переносу та оцінки доз, баз даних, організації розрахункового процесу тощо. Можливі розбіжності в оцінках експертів різних країн можуть бути зумовлені низкою різноманітних факторів: від використання різних джерел інформації до особливостей критеріальної бази в частині захисних заходів відповідно до національних вимог. Ці фактори потребують ідентифікації як в практичній, так і в науковій площині. Гармонізація діяльності з оцінки радіаційних наслідків проводиться на міжнародному рівні та є метою діяльності за багатьма міжнародними проектами.

У статті наведено інформацію щодо сучасних наукових ініціатив, спрямованих на вдосконалення оцінок та прогнозів радіологічного впливу для визначення невідкладних контрзаходів щодо захисту населення на ранніх фазах аварії на АЕС, зокрема, підходів до підготовки вихідних даних та проведення

оцінок та прогнозування. Також наведено огляд міжнародної діяльності з бенчмаркінгу, описано досвід протиаварійних тренувань за останні декілька років та виділено актуальні проблеми прогнозування радіаційних наслідків у реальному часі.

Ключові слова: аварійне реагування, оцінка радіаційних наслідків, бенчмаркінг, інструменти прогнозування.

© Балашевська Ю. В., Кириленко Ю. О., Печериця О. В., Шевченко І. А., Богорад В. І., 2020

Наслідки надзвичайних ситуацій радіологічного або ядерного характеру за своїми масштабами можуть варіюватися від радіоактивного ураження локального характеру (промисловий майданчик АЕС) до сотень та навіть десятків сотень кілометрів, охоплюючи території інших держав (трансгосподарний перенос). Оптимальне використання зусиль та ресурсів, які потрібно залучити до пом'якшення наслідків радіаційних аварій, вимагає швидкої прогнозування оцінки радіологічних наслідків ще під час розвитку аварії бажано до її гострої фази, пов'язаної з аварійним викидом.

Публікація Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) GSR ч. 7 [1] установлює основні вимоги щодо порядку аналізу радіологічної події та ефективного вживання невідкладних заходів захисту та інших заходів реагування на події ядерного та радіологічного характеру. Серед іншого, результати оцінки радіологічного впливу використовуються як ефективний інструмент обґрунтування та прийняття рішення про дії щодо пом'якшення наслідків, яких повинні вжити оперативний персонал та відповідальні органи, як основу для класифікації події, а також, для прийняття рішення щодо захисту як персоналу, так і населення. Відповідно до вимог GSR ч. 7 [1], ефективність аварійного планування пов'язана з організацією своєчасного моніторингу та оцінки забруднення довкілля, величини та інтенсивності радіоактивних викидів, доз опромінення персоналу та населення для прийняття рішення щодо своєчасного введення заходів реагування, які вживаються або яких має бути вжито під час аварії. Все це на першому етапі аварійного реагування потребує використання програмних засобів, які дозволяють на основі реальних метеорологічних даних та оцінки стану АЕС робити швидкі прогнозні оцінки масштабів локалізації радіоактивного ураження.

Поруч із такими програмними засобами експрес оцінки радіаційних наслідків як InterRAS/RASCAL [2] та HotSpot [3], сьогодні у світовій практиці все ширше для моделювання радіаційних наслідків використовуються системи підтримки прийняття рішень (СППР) реального часу (RODOS, ARGOS, RTARC тощо [4]). Крім первинного напряму використання цих програмних комплексів – аварійного реагування – їх застосовують для цілей аварійної готовності та планування, кількісного та якісного аналізу можливих сценаріїв розвитку радіаційної обстановки. Це пояснюється, передусім, широкими можливостями цих інструментів як з погляду розрахункової потужності, так і

з погляду зручності введення вихідних даних, отримання та аналізу результатів оцінки.

Досвід експертів ДНТЦ ЯРБ з оцінки радіаційних наслідків

Серед розрахункових потужностей Інформаційно-кризового центру (ІКЦ) Державної інспекції ядерного регулювання України (Держатомрегулювання) можна виділити низку програмних засобів, які використовуються експертами з радіаційних наслідків у реальному часі. Насамперед це програми експрес-оцінки (HotSpot, InterRAS) та європейська СППР RODOS. Порівняльний аналіз цих засобів (Таблиця 1) демонструє, що кожен з них має низку унікальних якостей, які виправдовують використання всіх трьох засобів одночасно. Проте, незважаючи на відносно великий час розрахункових процедур, СППР RODOS вважається найбільш універсальним і маневреним програмним комплексом, що дозволяє проводити оцінки атмосферного переносу в різних просторових масштабах та отримувати найбільш повний спектр необхідних результатів.

Аналіз чутливості таких первинних результатів моделювання атмосферного розповсюдження, як інтегральна концентрація радіонукліду у приземному шарі повітря до загального пакету початкових даних системи [4, 5], показує, що однією з основних проблем під час прогнозування радіаційних наслідків є невизначеності у вихідних даних щодо джерела викиду. До таких даних належать, зокрема, інтенсивність викиду дозоутворюючих радіонуклідів на різних проміжках часу, ефективна висота, радіонуклідний склад, фізико-хімічні форми радіоізотопів йоду тощо.

Основною метою прогнозування джерела викиду є отримання масивів вихідних параметрів залежно від змінної часу (хронології викиду) за допомогою окремих аналітичних та/або чисельних засобів. Утім, наразі суттєвою проблемою є підготовка коректного та повного пакету вихідних даних, зокрема, в частині джерела викиду для кожного з аварійних сценаріїв, які гіпотетично можуть розглядатися в реальному часі. Крім параметрів джерела викиду на невизначеність результатів оцінки радіаційних наслідків також можуть впливати чисельні дані метеорологічного прогнозу, тип та константи моделі атмосферної дисперсії, дозові коефіцієнти та моделі дозоутворення, моделі контрзаходів, результати аварійного моніторингу та спостережень (якщо йдеться про реконструкцію джерела викиду).

Таблиця 1 – Програмні засоби оцінки радіаційних наслідків у реальному часі ІКЦ

Програма / система	HotSpot	InterRAS	СППР RODOS
Модель атмосферної дисперсії	гаусова (залповий викид)	гаусова puff-модель	гаусова puff-модель (ATSTEP, RIMPUFF), Лагранжа (DIPLOT, LASAT), Ейлера (MATCH)
Обмеження за відстанню	~50 км	~80 км	>3000 км (модель MATCH)
Тип введення метеоданих	вручну (стаціонарні поля)	вручну (стаціонарні поля)	вручну (стаціонарні поля) / дані чисельного метеопрогнозу (динамічні поля)
Стан енергоблока	не враховує	враховує	не враховує
Шляхи опромінення	інгаляція, хмара, ґрунт, вторинний вітровий підйом	інгаляція, хмара, ґрунт, вторинний вітровий підйом	інгаляція, хмара, ґрунт, вторинний вітровий підйом, продукти харчування, дози від поверхневого забруднення шкіри
Типи доз опромінення	ефективна, на щитоподібну залозу, шкіру, кістки, шлунково-кишковий тракт, легені тощо	ефективна, на щитоподібну залозу, шкіру, кістки, шлунково-кишковий тракт, легені	ефективна, на щитоподібну залозу, шкіру, кістки, шлунково-кишковий тракт, легені тощо спектральні розподіли доз за когортами
Рекомендації щодо контрзаходів	ні, але попереджує про перевищення встановлених рівнів	ні, але попереджує про перевищення рівнів, що встановлені за замовчуванням	евакуація, укриття, йодна профілактика, переселення, обмеження на вживання місцевих продуктів харчування
Час розрахунку	<1 хв.	<1 хв.	від 5 до 20 хвилин (залежно від моделі атмосферної дисперсії та швидкодії процесора)

Реконструкція джерела викиду під час аварії на Чорнобильській АЕС 1986 року та на АЕС Фукусіма-1 2011 року, як і повторний аналіз радіаційних наслідків, що стосується гострих фаз цих аварій, відбувається до сьогодні. Для цих подій нараховується більше десятка інтерпретацій результатів реконструкції джерел викиду та моделей розповсюдження [6].

Противарійні тренування як інструмент удосконалення системи аварійної готовності та реагування

Противарійні тренування проводяться як для умовних внутрішніх аварійних подій на енергоблоках українських атомних електростанцій (АЕС), так і для зовнішніх із можливим транскордонним впливом на населення України. За останні 5 років фахівці ДНТЦ ЯРБ взяли участь у більш ніж 15 противарійних тренуваннях. Серед них можна виділити участь у міжнародних тренуваннях МАГАТЕ форматів ConvEx-2d (АЕС Чернавода, 2016 р.), ConvEx-3 (АЕС Пакш, 2017 р.), ConvEx-2с (Ірландія, 2018 р.), ConvEx-2d (АЕС Форсмарк, 2019 р.) і ConvEx-2d (2020 р.), спіль-

ному тренуванні регулюючих органів Норвегії та України (2019 р.), а також загальностанційних тренуваннях на Рівненській АЕС (2017 р.), на Южно-Українській АЕС (2018 р.) та на Запорізькій АЕС (2018 р.).

На жаль, результати оцінок та прогнозування радіаційних наслідків умовних подій у щорічних загальностанційних або міжнародних противарійних тренуваннях не завжди піддаються порівнянню, оскільки ці заходи мають на меті перевірку більш глобальних аспектів аварійного реагування, наприклад, таких як процедури та канали інформаційного обміну або допомога постраждалій країні у вигляді експертної підтримки. Крім того, деякі країни мають достатньо обмежені ресурси для моделювання атмосферного переносу.

Бенчмаркінг як інструмент вдосконалення

Аварія на АЕС Фукусіма-1 наголосила на важливості ефективного реагування на радіаційні аварії, зокрема виділила надійну оцінку потенційних наслідків. Однак, складність перебігу цієї аварії в

поєднанні з наслідками землетрусу та цунамі значно вплинула на здатність надавати своєчасну та точну інформацію відповідним національним та міжнародним органам. Деякі рекомендації щодо заходів захисту, які давали уряди країн своїм громадянам, час від часу різнилися, особливо на початкових стадіях аварії. Такі відмінності можуть пояснюватись сукупністю різноманітних факторів, включно з методами та моделями, які використовувались для оцінки прогресування та розвитку аварій, моделями оцінки та прогнозування викидів радіонуклідів у навколишнє середовище, якістю метеорологічного прогнозу тощо.

У рамках валідації моделей на даних реальних вимірювань, перехресної перевірки або бенчмаркінгу з метою аналізу результатів застосування різних моделей, у деяких випадках з урахуванням підходів та можливостей експертів з оцінки та прогнозування радіаційних наслідків, за участю організацій в усьому світі запускаються відповідні проекти. З часів аварії на АЕС Фукусіма-1 було проведено чимало досліджень в низці європейських та міжнародних проектів у сфері готовності та аварійного реагування. Проект FASTRUN [4] мав на меті порівняння існуючих швидкодіючих інструментів та підходів до оцінки як джерела викиду (фаза 1), так і подальших радіологічних наслідків (фаза 2). Значні розбіжності, виявлені на фазі 1, спонукали фахівців створити проектну пропозицію FASTNET, яка згодом отримала фінансування. Тому FASTNET був орієнтований на розробку та гармонізацію використання оперативних інструментів прогнозування лише для оцінки джерела викиду. Дослідження показали, що існує набір факторів, які можуть призвести до помітних відмінностей у розподілах доз опромінення зі збільшенням відстані від джерела викиду.

Також серед актуальних проектів за цим напрямком можна виділити проект Benchmarking on Assessment of Radiological Consequences (BARCO), який був ініційований ДНТЦ ЯРБ у 2019 та виконуватиметься протягом 2020 року.

Обрання ДНТЦ ЯРБ саме бенчмаркінгу форматом наукового проекту зумовлено низкою причин. Незважаючи на те, що бенчмаркінг часто вважається «антистратегічним» інструментом через те, що орієнтує на впровадження найкращого досвіду та наслідування його замість того, щоб заохочувати до інновацій, його безумовною перевагою є встановлення своєрідного стандарту ефективності та покращення його впровадження, завдяки детальному аналізу дій, які сприяють одержанню найкращого досвіду. До того ж, бенчмаркінг є викликом усталеній практиці та наочно демонструє її недоліки, що є особливо важливим для прогнозування радіаційних наслідків як основи прийняття управлінських рішень під час ядерної або радіаційної аварії. В межах BARCO бенчмаркінг розглядається як інструмент управління якістю, спрямований на порівняльний

аналіз програмних засобів моделювання для аварійної готовності та реагування на надзвичайні ситуації, оцінки використання актуальних інструментів моделювання та методичних підходів.

Фахівцями з моделювання організацій-членів ETSON (ENEA (Італія), VTT (Фінляндія), LEI (Литва), GRS (Німеччина)) для обраного аварійного сценарію, на базі єдиних вихідних даних, підготовлених експертами ДНТЦ ЯРБ, здійснено розрахунки радіаційних наслідків з використанням власних інструментів, методик, баз даних тощо в умовах обмежень (часових, ресурсних), які можуть мати місце під час реальної аварії. ДНТЦ ЯРБ буде проведено аналіз загальної картини відхилень результатів моделювання атмосферного переносу та оцінки доз за основними критеріями GSR ч. 7 як в локальному, так і в глобальному просторових масштабах.

Запропонований підхід до бенчмаркінгу носить як наукове, так і практичне значення для ідентифікації існуючих прогалів у моделюванні, використання метеорологічних даних та інших баз даних, що використовуються учасниками проекту BARCO, підходів до аналізу та інтерпретації результатів радіологічних наслідків аварій. Очікувані результати проекту – поліпшення точності моделювання, підвищення можливостей членів ETSON з оцінки радіологічних наслідків та зміцнення зв'язків у міжнародній спільноті з питань аварійної готовності та реагування.

Міжнародна діяльність у сфері підвищення якості прогнозування

Протягом останніх років ДНТЦ ЯРБ бере участь у декількох міжнародних проектах щодо використання програмних засобів оцінки та прогнозування радіаційних наслідків. Наприкінці 2019 року стартував координаційний дослідницький проект МАГАТЕ (IAEA CRP J15002 [7]), присвячений підвищенню ефективності використання програмних засобів прогнозування радіаційних наслідків. Очікується, що цей проект допоможе державам-членам МАГАТЕ краще зрозуміти переваги та обмеження використання інструментів прогнозування дози. Порівняння результатів моделювання з фактичними даними минулих подій дозволить експертам вивчити та оцінити обмеження та невизначеності.

Невизначеності в результатах прогнозування можуть мати місце навіть в межах використання одного програмного продукту. Так, наприклад, з початку 2020 року ДНТЦ ЯРБ бере участь у дослідженнях щодо застосування підходу HERCA-WENRA в частині використання моделей локального переносу СППР RODOS, що використовується експертами Групи аналізу даних ІКЦ Держатомрегулювання. Спільно з розробниками системи планується провести аналіз можливих відхилень у результатах існуючих моделей атмосферної дисперсії СППР RODOS (Таблиця 2).

Таблиця 2 – Атмосферні моделі СППР RODOS [8]

Назва моделі	Короткий опис	Розміри розрахункових сіток, км	Роздільна здатність для виводу результатів (мінімальна), м	Формат метеорологічних даних	Примітка
RIMPUFF (RIsø Mesoscale PUFF model)	мезомасштабна лагранжева паф-модель	20 40 100 200 400 800	50×50	стаціонарні поля / чисельні дані двійкового формату NetCDF	враховує початкові параметри дисперсії; відзначається стабільною роботою
LASAT (LAgrange Simulation of Aerosol Transport)	комбінована лагранжева паф-модель та модель блукаючих часток	20 40 100 200 400 800	50×50	стаціонарні поля / чисельні дані двійкового формату NetCDF	використовує затверджену методику розрахунку доз опромінення
DIPCOT (DIspersion over COmplex Terrain)	комбінована лагранжева паф-модель та модель блукаючих часток	20 40 100 200 400 800	50×50	стаціонарні поля / чисельні дані двійкового формату NetCDF	враховує нерівномірність рельєфу, однак, не враховує початкові параметри дисперсії
MATCH (Mesoscale Atmospheric Transport and Chemistry)	мезомасштабна ейлерова модель дальнього переносу	не обмежується	~38000× 52000	чисельні дані HIRLAM, дані бінарного формату GRIB	використовується для задач глобального переносу, має обмежену кількість хронологічних інтервалів для опису джерела викиду

Актуальні проблеми прогнозування

На шляху розвитку інструментарію щодо оцінки радіаційних наслідків у реальному часі стоїть чимало викликів. Наразі одним із амбітних напрямків розвитку систем підтримки прийняття рішень є розв'язання зворотної задачі щодо визначення координат та характеристик джерела викиду за результатами проведених вимірювань на місцевості.

Як показує практика розрахунків для лісових пожеж у зоні відчуження і зоні безумовного (обов'язкового) відселення (ЗВіЗБ(О)В), в більшості випадків удається досить швидко оцінити орієнтовну магнітуду викиду за умови наявності даних вимірювань у ближній зоні викиду. Однак, коли йдеться про відносно великі просторові масштаби, ця процедура потребує значного часу на збір та обробку даних, аналізу невизначеностей, проведення інверсійного розрахунку.

Пости радіаційного контролю АЕС України та АСКРО у ЗВіЗБ(О)В неодноразово фіксували наявність радіонуклідів техногенного походження у пові-

трі на території країни. Так, за повідомленням Державного спеціалізованого підприємства «Екоцентр», в період 18 – 23 лютого 2018 року на чотирьох контрольних пунктах було зафіксовано підвищення об'ємної активності ізотопу I-131 в межах значень 2,1 – 3,3 мкБк/м³. Виявлені концентрації I-131 не призвели до будь-якого значущого радіологічного впливу на населення. На момент фіксації радіоїоду джерело викиду не було локалізовано. Зауважимо, що аналогічні ситуації детектування цього ізотопу в повітрі над територією України внаслідок транскордонного переносу спостерігались і раніше (жовтень 2016 року, лютий 2017 року) [9].

Очевидно, що проведення інверсійних оцінок для подій у великих просторових масштабах потребують залучення спеціалізованих програмних засобів та окремих методичних підходів. У роботах [10, 11] пропонується підхід, що дозволяє локалізувати місце та визначити інтегральні характеристики джерела викиду за допомогою мезомасштабної моделі атмосферного переносу MATCH СППР RODOS. Проте, ця методика накладає низку вимог на повноту цих вимірювань інтегральних концен-

трацій. Крім того, завдання ускладнюється тим, що в кожному випадку формат та повнота вихідних даних є індивідуальними. На сьогодні питання формування універсальних підходів щодо вирішення зворотної задачі залишається на етапі досліджень.

Яскравим прикладом вирішення зворотної задачі стали розрахунки з використанням СППР RODOS експертами групи спеціалістів Федерального офісу з радіаційної безпеки (BfS, Німеччина) [12], фахівцями Інституту проблем математичних машин і систем НАН України та Рівненської АЕС [13], проведені після інциденту з викидом Ru-106 у вересні-жовтні 2017 року. Оцінки здійснювались за допомогою моделі MATCH на базі даних вимірів активності Ru-106 у приземних шарах атмосфери країн східної та центральної частин Європи, та конвертованих чисельних метеоданих із зворотнім напрямком вітру. Проте, уточнення можливої області знаходження джерела викиду після цієї події могли займати період від тижнів до декількох місяців.

Висновки

На сьогодні системи підтримки прийняття рішень активно використовуються як один із потужних засобів оперативної оцінки радіологічних наслідків радіаційних аварій у кризових центрах багатьох країн.

Незважаючи на значні труднощі під час проведення прогнозних оцінок радіологічних наслідків радіаційних аварій (великі невизначеності у вихідних даних, затримка або відсутність поточних даних метеорологічного прогнозу або інформації щодо джерела викиду), застосування високоінтелектуальних програмних засобів є одною із найважливіших складових всієї системи аварійного реагування.

Бенчмаркінг та діяльність з порівняльних оцінок фаховими організаціями у міжнародних масштабах сприяє досягненню консенсусу в умовах широкої диверсифікації інструментів прогнозування та методів оцінки, дозволяє уникати критичних розбіжностей, від яких може залежати захист населення багатьох країн.

Список використаної літератури

1. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. GSR Part 7. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2015. 136 pp.
2. Ramsdell J., Atheyb G., Rishel J. RASCAL User's Guide. Pacific Northwest National Laboratory, 2013. 125 pp.
3. Homann S., Aluzzi F. HotSpot Health Physics Codes. Version 3.0. User's Guide. Livermore : National Atmospheric Release Advisory Center, Lawrence Livermore National Laboratory, 2014. 198 pp.

4. Benchmarking of fast-running software tools used to model releases during nuclear accidents NEA/CSNI/R(2015)19. Nuclear Energy Agency, 2016. 134 pp.

5. Caminada G., French S., Politis K. Uncertainty in RODOS. RODOS(B)-RP(94)-05, 2011.

6. Evangeliou, N., Hamburger, T., Cozic, A., Balkanski, Y., and Stohl, A.: Inverse modeling of the Chernobyl source term using atmospheric concentration and deposition measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 8805–8824, 2017. doi: 10.5194/acp-17-8805-2017.

7. New CRP: Effective Use of Dose Projection Tools in the Preparedness and Response to Nuclear and Radiological Emergencies (CRP J15002) URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/new-crp-effective-use-of-dose-projection-tools-in-the-preparedness-and-response-to-nuclear-and-radiological-emergencies-crp-j15002>.

8. JRodos user's guide An off-site emergency management system for nuclear accidents. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), March 2017. 9. Офіційні повідомлення Державної інспекції з ядерного регулювання України. URL: <http://www.snrc.gov.ua/>.

10. Романенко А.Н., Ковалец І.В. Евдин Е.А., Анулич С.Н. Локалізація источника радиоактивного выброса / 36. доп. І-ї дист. наук.-практ. конф. з міжнар. участю «Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика. СППР'2015». К., 2015. С. 58-61.

11. Romanenko O., Kovalets I., Anulich S., Solution of the Source Identification Problem with Using the JRODOS MATCH / Conference: Decision Support Systems. Theory and Practice (DSS'2017), Kyiv, 2017.

12. Press-release «BfS staff members contribute to investigation into increased ruthenium levels». URL: <http://www.asse.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BfS/EN/2018/001.html>.

13. Повідомлення для сайту НАН України «Виявленню рутенію-106 у вересні–жовтні 2017 року: звідки могло потрапити забруднення?». URL: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/doccatalog/document;jsessionid=D473375F1AE01DC05BD26E3E55C1FF73.app1?id=379987>.

References

1. GSR Part 7. Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2015, 136 p.
2. Ramsdell, J., Atheyb, G., Rishel, J. (2013). RASCAL User's Guide. Pacific Northwest National Laboratory, 125 p.
3. Homann, S., Aluzzi, F. (2014). HotSpot health physics codes. Version 3.0. User's Guide. National Atmospheric Release Advisory Center, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 198 p.
4. NEA/CSNI/R(2015)19. Benchmarking of fast-running software tools used to model releases during nuclear accidents. Nuclear Energy Agency, 2016, 134 p.
5. Caminada, G., French, S., Politis, K. (2011). Uncertainty in RODOS. RODOS(B)-RP(94)-05.

6. Evangeliou, N., Hamburger, T., Cozic, A., Balkanski, Y., Stohl, A. (2017). Inverse modeling of the Chernobyl source term using atmospheric concentration and deposition measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 8805–8824. doi: 10.5194/acp-17-8805-2017.

7. JRodos User's Guide. (2017). An off-site emergency management system for nuclear accidents. Karlsruhe Institute of Technology (KIT).

8. New CRP. Effective use of dose projection tools in the preparedness and response to nuclear and radiological emergencies (CRP J15002). Retrieved from: <https://www.iaea.org/newscenter/news/new-crp-effective-use-of-dose-projection-tools-in-the-preparedness-and-response-to-nuclear-and-radiological-emergencies-crp-j15002>.

9. SNRIU website. Official messages. Retrieved from: <http://www.snrc.gov.ua/>.

10. Romamenko, O., Kovalets, I., Ievdin, E., Anulich, S. (2015). Confinement of the radioactive release source. *Scient.-Pract Conference "Decision Support System. Theory and Practice. SPPr'2015"*, Kyiv, 58-61.

11. Romanenko, O., Kovalets, I., Anulich, S. (2017). Solution of the source identification problem with using the JRODOS MATCH. *Conference "Decision Support Systems. Theory and Practice (DSS'2017)"*, Kyiv.

12. Press Release. BfS staff members contribute to investigation into increased ruthenium levels. Retrieved from: <http://www.asse.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BfS/EN/2018/001.html>.

13. Website of the National Academy of Sciences of Ukraine. Notification "Detection of Ruthenium-106 in September-October 2017: Where could the pollution come from?" Retrieved from: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/doccatalog/document;jsessionid=D473375F1AE01DC05BD26E3E55C1FF73.app1?id=379987>.

Harmonization of Methodological Approaches and Real Time Radiological Consequence Forecasting Tools

Balashavska Yu., Kyrylenko Yu., Pecherytsia O., Shevchenko I., Bogorad V.

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

Determination of urgent countermeasures to protect the public in early phase of the accident at NPP requires providing of radiological impact assessment at different distances in real time. These activities involve current meteorological forecast data and information about source term parameters as one of the main part

of the emergency centers functioning worldwide for prompt notification about the radiological or nuclear event in the country, as well as abroad in the case of transboundary impact.

Experts' background in the assessment and forecasting of radiological consequences area may vary from country to country in terms of methodological approaches, the use of atmospheric dispersion models, doses assessment models, databases, organization procedures, calculation process etc. Possible deviations in the results of assessments performed by experts from different countries may be caused by a number of factors. Their reasons can vary from the use of different information sources to the specifics of protective actions criteria in accordance with national requirements. These factors should be identified both in practice and scientifically. Radiological consequence assessment activities are harmonized at the international level. It is the target of a wide range of international projects.

The paper provides information on modern scientific initiatives aimed at improving assessments and forecasts of radiological consequences to determine urgent countermeasures to protect the public at early phases of an accident at nuclear power plant, in particular, approaches to the initial data preparation and the conduct of assessments and forecasting. A review of international benchmarking activities as well as past emergency exercise overview is presented in the paper. Relevant problems of forecasting radiological consequences in real time are highlighted.

Keywords: emergency response, decision support system, radiological consequence assessment.

Отримано 12.05.2020.