

# Спільне використання мобільної радіологічної лабораторії та системи підтримки прийняття рішень як ефективний підхід до аварійного моніторингу

- **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>
  
- **Демченко Марія Вікторівна**  
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3249-2826>
  
- **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>
  
- **Коцуба Олександр Леонідович**  
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3864-9692>
  
- **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>

Проведення радіаційного обстеження та оперативний аналіз розповсюдження забруднення на прилеглих до АЕС територіях під час важкої аварії забезпечують надійне підґрунтя для прийняття рішень щодо вжиття дій та невідкладних контрзаходів для захисту персоналу і населення. Проте на практиці вибір просторово-часових параметрів вимірювань та пробовідбору часто ускладнений, зокрема несприятливою радіаційною обстановкою або обмеженістю в часі для збору даних тощо.

Якщо на ранніх етапах реагування для прийняття рішень щодо впровадження захисних заходів може бути достатньо попередніх результатів моделювання атмосферної дисперсії радіоактивних речовин та оцінки доз опромінення для постульованого сценарію розвитку подій, то з надходженням перших результатів моніторингу, задля уточнення моделі та забезпечення підстав для інтерпретації її результатів, виникає потреба у підсиленні інструментів прогнозування радіаційних наслідків використанням їх сумісно із засобами мобільного моніторингу.

Наявні методики та рекомендації МАГАТЕ щодо аварійного моніторингу залишають простір для впровадження можливостей сучасних інструментів моделювання. Ця стаття містить перші напрацювання для розробки методології спільного використання системи підтримки прийняття рішень та мобільної лабораторії з метою успішного проведення аварійного моніторингу навколишнього середовища у реальному часі. Наведені у ній результати дослідження, виконаного в межах координованого дослідження МАГАТЕ CRP J1 5002, стосуються сумісного використання мобільної радіологічної лабораторії RanidSONNI та європейської системи підтримки прийняття рішень JRODOS.

Застосовані підходи ґрунтуються на нинішньому досвіді Державного підприємства «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» у підтвердженні результатів моделювання реальними даними вимірювань параметрів радіаційної обстановки, наданими мобільною лабораторією під час реагування на лісові пожежі в зоні відчуження і зоні безумовного (обов'язкового) відселення протягом останніх років.

Ключові слова: аварійний моніторинг, мобільна радіологічна лабораторія, важка аварія, система підтримки прийняття рішень.

© Балашевська Ю. В., Демченко М. В., Кириленко Ю. О., Коцуба О. Л., Печериця О. В., Шевченко І. А., 2022

## Вступ

У сучасних реаліях безпечної роботи ядерних установок велику роль відіграє ланка «експлуатуюча організація – національний регулятор ядерної та радіаційної безпеки». Синергія та водночас незалежність цих двох елементів є гарантом захисту населення і довкілля як під час нормальної експлуатації підприємств атомної галузі, так і у разі її порушень або аварій.

Радіаційний моніторинг та прогнозування радіаційних наслідків під час аварії – і з боку оператора, і з боку регулятора – є невід'ємними складовими аварійного реагування, зокрема дослідження розвитку ситуації за межами промислового майданчика, де в перші дні або тижні основні радіаційні наслідки для населення та довкілля спричинені атмосферним переносом радіонуклідів.

На ранній фазі реагування під час аварії на Чорнобильській АЕС (1986 рік) були задіяні всі доступні тоді ресурси для проведення радіаційного моніторингу на територіях, що прилягають до промислового майданчика АЕС. На цьому етапі, через гострий дефіцит інформації для прийняття рішень, основною задачею моніторингу на уражених територіях було охоплення максимального числа об'єктів для створення достовірної картини забруднення [1].

У Києві радіаційний моніторинг здійснювався, зокрема, засобами вимірювальної техніки Інституту ядерних досліджень Національної ака-

демії наук України (ІЯД) [2]. Починаючи з 26 квітня 1986 року, Центром екологічних проблем ядерної енергетики Академії наук УРСР, заснованим на базі Відділу радіаційної біофізики ІЯД, проводились роботи з аналізу радіаційної обстановки у Київській та сусідніх з нею областях Української та Білоруської республік. Фактично, контрзаходи, впроваджені в перші дні після початку аварії, спиралися на результати моніторингу в конкретних населених пунктах. Засвоєний досвід став підґрунтям для проєктів, що забезпечили розвиток та використання кризовими центрами у багатьох країнах систем підтримки прийняття рішень (СППР) – програмних засобів, призначених для прогнозування радіаційних наслідків аварій.

Під час аварії на АЕС «Фукусіма-1» (2011 рік), за даними Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) [3], через втрату електроживлення оцінки джерела викиду не могли бути проведені за допомогою штатної системи ERSS (Emergency Response Support System), що призвело до зниження ефективності використання програмної системи SPEEDI для подальшої оцінки радіаційних наслідків поза межами промислового майданчика. Відповідно до офіційного звіту комісії з розслідування причин аварії [4], у перші години та дні аварійних подій на АЕС «Фукусіма-1» альтернативні методичні, програмні засоби або заздалегідь розраховані бібліотеки викидів для переліку типових важких аварій не стали підставою для прийняття рішення про проведення невідкладних контрзаходів щодо захисту населення Японії.

Зважаючи на контекст, можливості та особливості реагування під час важких аварій на АЕС у світі, з розвитком можливостей СППР та досвідом Державного підприємства «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» (ДНТЦ ЯРБ), отриманим під час реагування на лісові пожежі 2015, 2018 та 2020 років [5]-[7], питання ефективності спільного використання мобільних засобів для радіаційного моніторингу та СППР у реальному часі саме під час важких аварій на АЕС все частіше виникало в експертному середовищі. Сьогодні СППР здатні надавати такі масиви даних для моніторингу, як прогнозована метеорологічна ситуація, прогнозовані значення параметрів, які будуть виміряні під час моніторингу, та орієнтовні значення індивідуальних доз, отриманих персоналом, що виконує вимірювання. Зі свого боку, результати розвідки, з урахуванням даних інших ресурсів (пости автоматизованої системи контролю радіаційної обстановки (АСКРО) АЕС України, мережа Українського гідрометеорологічного центру (УкрГМЦ)), можуть окреслити фактичну картину радіаційної обстановки на місцевості або у конкретних населених пунктах.

Очікується, що практика поєднання мобільних засобів для виконання радіаційного моніторингу та інструментів моделювання атмосферної дисперсії та радіаційних наслідків може суттєво пришвидшити та оптимізувати процедуру визначення зон проведення контрзаходів щодо захисту населення, що допоможе досягти максимальних відвернутих доз опромінення населення згідно з чинними нормами НРБУ-97 [8].

### **Радіаційний моніторинг під час пожеж у зоні відчуження і зоні безумовного (обов'язкового) відселення**

Уперше досвід спільного використання результатів моделювання атмосферної дисперсії для вибору оптимальних точок виконання вимірювання параметрів радіаційної обстановки був отриманий під час пожеж 2018 року. Втім, на той період спеціальний модуль прогнозування наслідків лісових пожеж – модуль лісових пожеж європейської системи JRODOS [9] – знаходився на етапі розробки Технологічним інститутом Карлсруе (KIT).

У квітні 2020 року, в період запровадження протиепідемічних заходів, пов'язаних з пандемією гострої респіраторної хвороби COVID-19, на території зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення (ЗВіЗБ(О)В) спостерігались масштабні пожежі, які охопили десятки гектарів радіоактивно забруднених лісів. Для своєчасного інформування про поточний радіаційний стан мешканців Києва екіпажем мобільної радіологічної лабораторії (МРЛ) RANIDSONNI ДНТЦ ЯРБ виконува-

лися радіаційні обстеження на території смт. Гостомель Бучанського району Київської області та м. Київ. З огляду на суворі карантинні обмеження, які тоді діяли на території України, та мінімальний час на реагування, експертами ДНТЦ ЯРБ було проведено пошук оптимальної точки відбору проб аерозолів та місця проведення вимірювань для перевірки результатів виконаного моделювання. Їх було обрано відповідно до результатів прогнозування, виконаного за допомогою СППР JRODOS.

### **Координоване дослідження МАГАТЕ (проєкт CRP J15002)**

З розвитком можливостей СППР та досвідом ДНТЦ ЯРБ, отриманим під час реагування на лісові пожежі в ЗВіЗБ(О)В, з 2018 року експертами все частіше обговорювалось питання ефективності спільного використання портативних (або мобільних) засобів для виконання радіаційного моніторингу та СППР у реальному часі у разі важких аварій на енергоблоках українських АЕС. З переліку необхідної для успішного проведення радіаційного моніторингу за допомогою мобільних засобів інформації сучасні СППР здатні надавати прогнози щодо розвитку метеорологічної ситуації, орієнтовні значення параметрів, які будуть виміряні під час моніторингу, а також приблизні оцінки дозових навантажень на членів екіпажу за час виконання робіт. Водночас, отримані результати вимірювань можуть змалювати детальну картину радіаційної обстановки у населеному пункті або на місцевості. Отже, проведення радіаційного моніторингу та швидкий аналіз результатів у разі надзвичайних ситуацій є найкращим варіантом для оптимізації процесу прийняття рішень для застосування вчасних та виправданих захисних контрзаходів.

Для підвищення точності моделювання та забезпечення надійного підґрунтя для інтерпретації даних вважається за доцільне одночасне проведення радіаційного картографування та відбору проб аерозолів з використанням МРЛ у зонах, прилеглих до місця розташування джерела викиду. У поєднанні з безперервним оновленням метеорологічних даних результати моніторингу стають потужним інструментом для уточнення моделі розповсюдження аварійного викиду (рисунки 1).

З 2019 року в межах координованого дослідження МАГАТЕ CRP J15002 щодо ефективного використання інструментів прогнозування в аварійній готовності та реагуванні на радіаційні аварії [10] експерти ДНТЦ ЯРБ виконують дослідження за цим напрямом. Проєкт передбачає розроблення методичних підходів до спільного використання СППР та МРЛ для проведення моніторингу під час ядерних та радіаційних аварій для посилення аварійного реагування.



Рисунок 1 – Загальна схема компліментарності засобів моніторингу та прогнозування

### Інструментарій дослідження

Для досліджень за прототип СППР обрано Java-версію онлайн-системи підтримки прийняття рішень у режимі реального часу для управління надзвичайними ситуаціями поза об'єктом RODOS – JRODOS [9]. Система JRODOS надає послідовну та вичерпну інформацію про розвиток аварійної ситуації, масштаби, переваги та недоліки аварійних дій та контрзаходів, методичне забезпечення прийняття рішень щодо стратегій реагування на надзвичайні ситуації. Основними користувачами системи є організації, відповідальні на місцевому, регіональному, національному та міжнародному рівнях за управління надзвичайними ситуаціями за межами майданчика – кризові центри АЕС, кризовий центр регулюючого органу, служби з надзвичайних ситуацій, гідрометеорологічні центри та інші. JRODOS має широкий добір моделей атмосферної дисперсії: модель гаусової плями (RIMPUFF), моделі Лагранжа (DIPLOT, LASAT), Ейлера (MATCH), які також використовуються в низці інших сучасних СППР [11]. Додаткові моделі оцінки гострих та довгострокових доз, опція завантаження карт та дружній інтерфейс системи значно полегшують процедуру прийняття рішень. Отже, система JRODOS дозволяє працювати в режимі реального часу для аналізу розвитку надзвичайних ситуацій за межами майданчика, а також є корисним програмним засобом для протиаварійних тренувань, аварійного планування та реагування.

Прототипом мобільної лабораторії у проєкті є МРЛ RANIDSONNI – мобільна лабораторія радіаційної розвідки виробництва компанії «Envirionics» (Фінляндія, [12]), виконана на

базі мікроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter та призначена для:

моніторингу радіаційної обстановки довкола об'єктів радіаційно-ядерних технологій (АЕС, дослідницьких реакторів, урановидобувних та переробних підприємств тощо) на всіх етапах життєвого циклу;

пошуку, ідентифікації та попередньої категоризації покинутих джерел іонізуючого випромінювання (ДІВ) та ДІВ, що можуть опинитися поза регулюючим контролем унаслідок стихійного лиха, аварійних ситуацій тощо;

радіаційного моніторингу для раннього виявлення ДІВ у місцях масового скупчення людей (зокрема під час проведення масових заходів);

підтримки Державної інспекції ядерного регулювання України (Держатомрегулювання) під час проведення інспекційних обстежень радіаційно-ядерних об'єктів.

Використання цих інструментів є достатнім для проведення досліджень щодо спільної роботи МРЛ та СППР.

### Метод дослідження

Загальний підхід передбачає, що результати моделювання в системі JRODOS використовуються як основа для подальшої побудови орієнтовного маршруту руху МРЛ та хронологічних рамок проведення моніторингу. В роботі моделювання виконувалось на базі джерел атмосферного викиду з роздільною здатністю за тривалістю одна година для двох умовних важких аварій, оцінених з урахуванням реалістичного підходу в розрахунковій моделі BBEP-1000/B320 коду MELCOR [13], а саме:

умовний аварійний сценарій № 1 «Теча першого контуру в другий (відрив кришки колектору парогенератора) з повним знеструмленням енергоблока», під час якого реалізується практично миттєвий викид з ефективною висоти 60-70 м;

умовний аварійний сценарій № 2 «Повне знеструмлення енергоблока з урахуванням роботи системи примусового скидання тиску (СПСТ)», який характеризується нестационарним подовженим викидом та диспропорцією між концентрацією  $^{137}\text{Cs}$  та значенням потужності еквівалентної дози (ПЕД) у приземному шарі повітря, порівняно із умовним аварійним сценарієм № 1, унаслідок фільтрації паро-газової суміші на фільтруючому обладнанні СПСТ.

Під час моделювання розглядалися дві метеорологічних ситуації:

стабільна (середня швидкість вітру <4 м/с, зміна напрямку вітру <90° за час викиду, категорія стійкості атмосфери за Паскуілом F-D, без опадів в радіусі 100 км від точки викиду);

нестабільна (середня швидкість вітру <7 м/с, зміна напрямку вітру >90° за час викиду, категорія стійкості атмосфери за Паскуілом D-A, з тимчасовими опадами в радіусі 100 км від точки викиду).

Радіаційні наслідки для умовних аварійних сценаріїв № 1 та № 2, що за активністю викиду відповідають рівням за шкалою INES – 7 та 5 [14], суттєво відрізняються за масштабами. Зони та відстані прийняття невідкладних контрзаходів щодо захисту населення у разі реалізації умовного аварійного сценарію № 1 перевищують відповідні зони та відстані для умовного аварійного сценарію № 2 в декілька разів, тому для обраних джерел викиду була використана низка розрахункових сіток за радіусами від 100 до 400 км. Тривалість прогнозу в системі JRODOS в обох випадках складала 36 год. Оцінки проведено на основі набору чисельних даних ме-

теорологічного прогнозу з просторовою роздільною здатністю 0,5°, обраних з архівних даних за минулі 2 роки.

Симуляцію дій МРЛ виконано для 2 принципово різних підходів до моніторингу – в радіоактивній хмарі (складова в сумарну ПЕД від хмари є суттєвою) та після її проходження, коли істотний вклад у результати вимірювання ПЕД формується випадіннями радіонуклідів на поверхню ґрунту.

Під час симуляції взаємодії СППР JRODOS та МРЛ враховано дві умовні конфігурації МРЛ: «ідеальна» та автомобіль радіаційної розвідки RanidSONNI. «Ідеальна» МРЛ – це мобільна лабораторія, яка здатна у повному обсязі забезпечити види вимірювань, зазначені в TECDOC-1092 [15] для лабораторного автотранспорту. Порівняння можливостей цих МРЛ наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Можливості автомобілю радіаційної розвідки RanidSONNI та «ідеальної» МРЛ

Назва мобільної лабораторії або лабораторного комплексу радіаційної розвідки		Автомобіль радіаційної розвідки RanidSONNI (МРЛ)	«Ідеальна» МРЛ	
Вимірювальні можливості	вимірювання ПЕД γ-випромінювання	так	так	
	ідентифікація радіонуклідів без відбору проб	так	так	
	вимірювання щільності потоку	альфа-випромінювання	так	так
		бета-випромінювання	так	так
		нейтронного випромінювання	так	так
	визначення знімного забруднення альфа-, бета-випромінювачами (метод мазка)	так	так	
	моніторинг щитовидної залози на поглинання радіоактивного йоду	ні	так	
	індивідуальний дозиметричний контроль і контроль радіоактивного забруднення персоналу, який бере участь в реагуванні, і зокрема, груп польового моніторингу	так	так	
	моніторинг шкірних покривів і одягу осіб із зони аварії до, під час і після дезактивації	так	так	
	відбір проб повітря	аерозольний фільтр	так	так
		вугільні (або цеолітові) касети	ні	так
	відбір проб	ґрунту	так	так
		води	так	так
		молока, харчових продуктів та кормів	так	так
		донних відкладів	ні	так
вимірювання загальної альфа-, бета активності проб повітря та води	ні	так		
гамма-спектрометрія <i>in-situ</i>	так	так		



Розташування точки симульованого викиду для умовної АЕС «NPP» у межах дослідження відповідає географічним координатам енергоблока № 1 Хмельницької АЕС. Маршрути руху МРЛ вибрано для фактичної інфраструктури місцевості в зоні спостереження Хмельницької АЕС та за її межами. У межах симуляції хронології спільного використання МРЛ та СППР було враховано орієнтовний час, який може бути витрачений на процедури моделювання, та на проведення вимірювань й відбору проб аерозолів в умовах радіаційної аварії на АЕС. Також, з метою відтворення реалістичної хронології розвитку подій враховувався орієнтовний час активізації Інформаційно-кризового центру Держатомрегулювання (ІКЦ). В роботі передбачається пряма комунікація експертів ІКЦ та екіпажу МРЛ, а маршрути сплановано зважаючи на припущення про те, що на момент умовної події автомобіль знаходиться в межах Києва.

Вибір точок проведення вимірювань та відбору проб здійснюється з огляду на поточне просторове розташування допустимих операційних

областей (ДОО), що гарантує неперевищення встановлених дозових меж для членів екіпажу МРЛ, задовільну метеорологічну ситуацію в точці вимірювань та/або відбору проби в найближчі декілька годин (відсутність сильного вітру, опадів тощо), а також забезпечує екіпаж МРЛ інформацією щодо прогнозованих значень вимірюваних параметрів (концентрації радіонуклідів та ПЕД), що дозволяє оптимізувати час проведення вимірювань та підібрати засоби індивідуального захисту.

Зауважимо, що перелік обмежуючих чинників може містити також вимоги до якості покриття мобільною мережею або особливості ландшафту чи інфраструктури. Розширення цього переліку зменшує площу ДОО та суттєво змінює конфігурацію її контурів.

Загальну концепцію побудови ДОО та маршруту МРЛ зображено на рисунку 2. Як фоновий шар використані поля ПЕД (мЗв/год) на 36-у годину після початку вихідної події за умовним аварійним сценарієм № 2 за нестабільної метеорологічної ситуації.

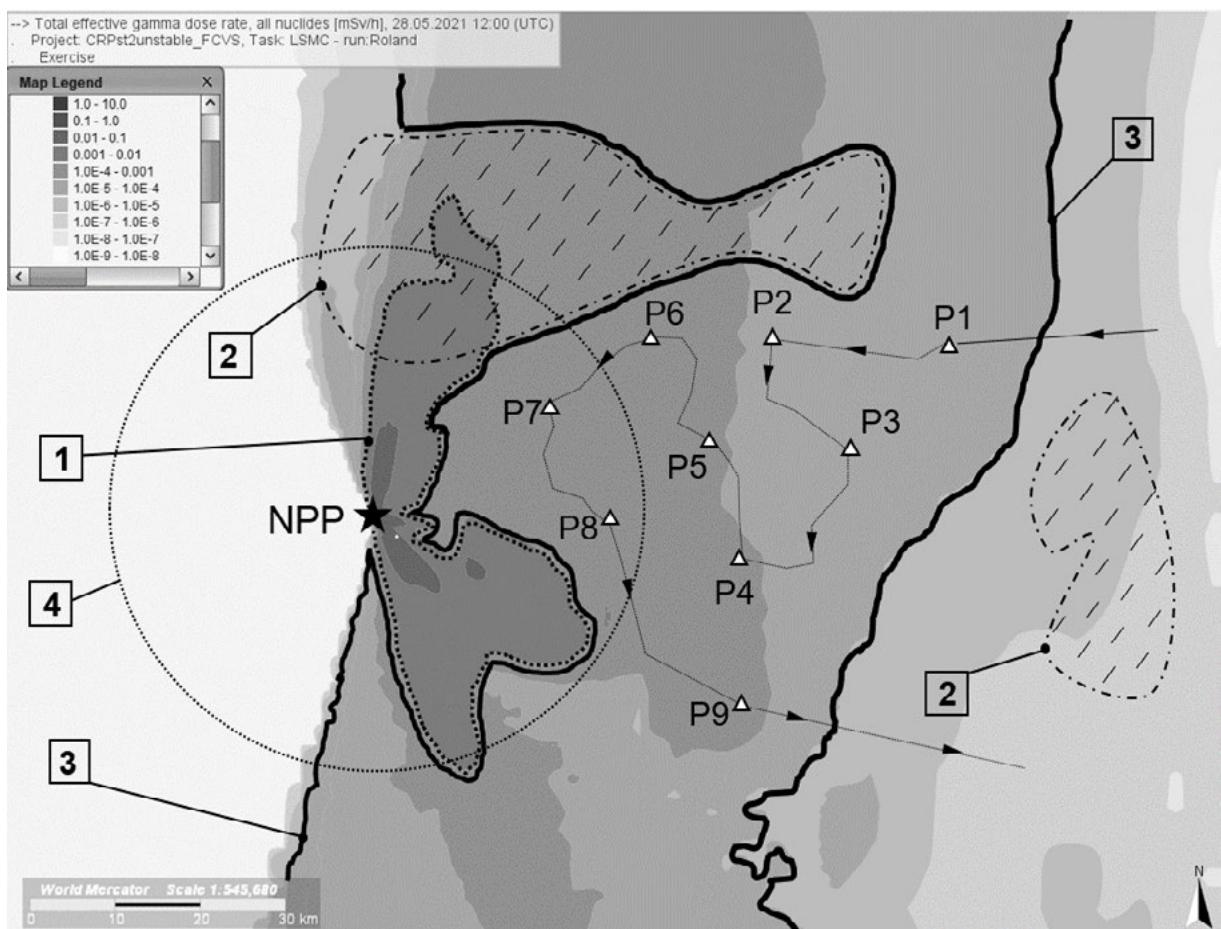


Рисунок 2 – Загальна схема побудови ДОО та маршруту руху МРЛ:

- 1 – контур області перевищення дозових лімітів для членів екіпажу МРЛ (20 мЗв/рік);
- 2 – область незадовільних метеорологічних умов (інтегральні опади 0,5 мм);
- 3 – остаточна ДОО (обмежується встановленими мінімальними рівнями доцільності моніторингу наявними засобами);
- 4 – зона спостереження АЕС «NPP»

## Результати досліджень

Було розглянуто 16 сценаріїв проведення радіаційної розвідки на місцевості, для кожного з яких побудовано маршрути руху МРЛ та визначено часові межі процедур прогнозування спільними силами експертів ІКЦ та моніторингу з описом алгоритмів дій екіпажу МРЛ. Для формування ДОО було прийнято низку припущень, зокрема:

дозові межі для членів екіпажу МРЛ, прийняті рівними 20 мЗв/рік (персонал категорії А);

нижня границя детектування концентрації  $^{137}\text{Cs}$  у приземному шарі атмосфери встановлювалась відповідно до технічних характеристик наявного обладнання та мінімального рекомендованого часу на пробовідбір;

значення інтегральних опадів за час прогнозування менші за 0,5 мм вважаються нехтувано малими та такими, що не враховуються в контурованні ДОО.

На рисунках 3-5 наведено варіанти маршрутів МРЛ, побудованих на полях інтегральної концентрації  $^{137}\text{Cs}$  у приземних шарах атмосфери за допомогою СППР JRODOS з урахуванням інфраструктури та дорожніх карт Google Maps [16].

Розроблені маршрути підлягають оптимізації як з погляду мінімізації часу на виконання вимірювань, так і з погляду радіаційного впливу на екіпаж МРЛ. Зокрема, знаючи реальний середній час на проведення того чи іншого виду вимірювання за очікуваних умов навколишнього середовища, можливе охоплення більшого числа точок або вибір маршруту за критерієм дозволеної індивідуальної дози опромінення за робочу зміну.

## Аналіз отриманих результатів

За результатами моделювання радіаційних наслідків вищерозглянутих сценаріїв важких аварій у СППР JRODOS було виявлено, що хронологічна нестабільність потужності аварійного викиду суттєво асоційована з поточною метеорологією (стабільна/нестабільна метеорологічна ситуація), завжди розглядається в сукупності та у кожному випадку індивідуально впливає на побудову маршруту руху МРЛ.

Для обох розглянутих сценаріїв важкої аварії за стабільної метеорологічної ситуації шлейф викиду розділяє ДОО на дві частини з обмеженням доступу з однієї в іншу.

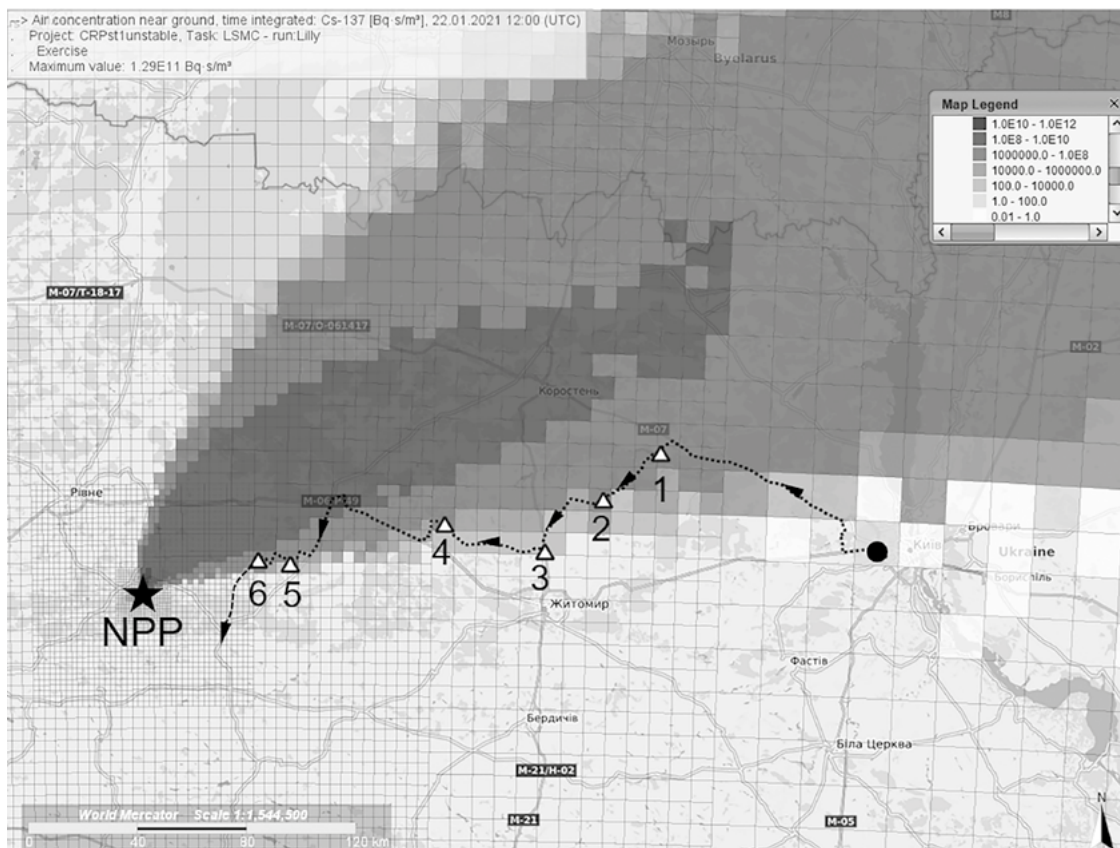


Рисунок 3 – Маршрут МРЛ під час виконання моніторингу для умовного аварійного сценарію № 1 «Теча першого контуру в другий (відрив кришки колектору парогенератора) з повним знеструмленням енергоблока», стабільна метеорологічна ситуація



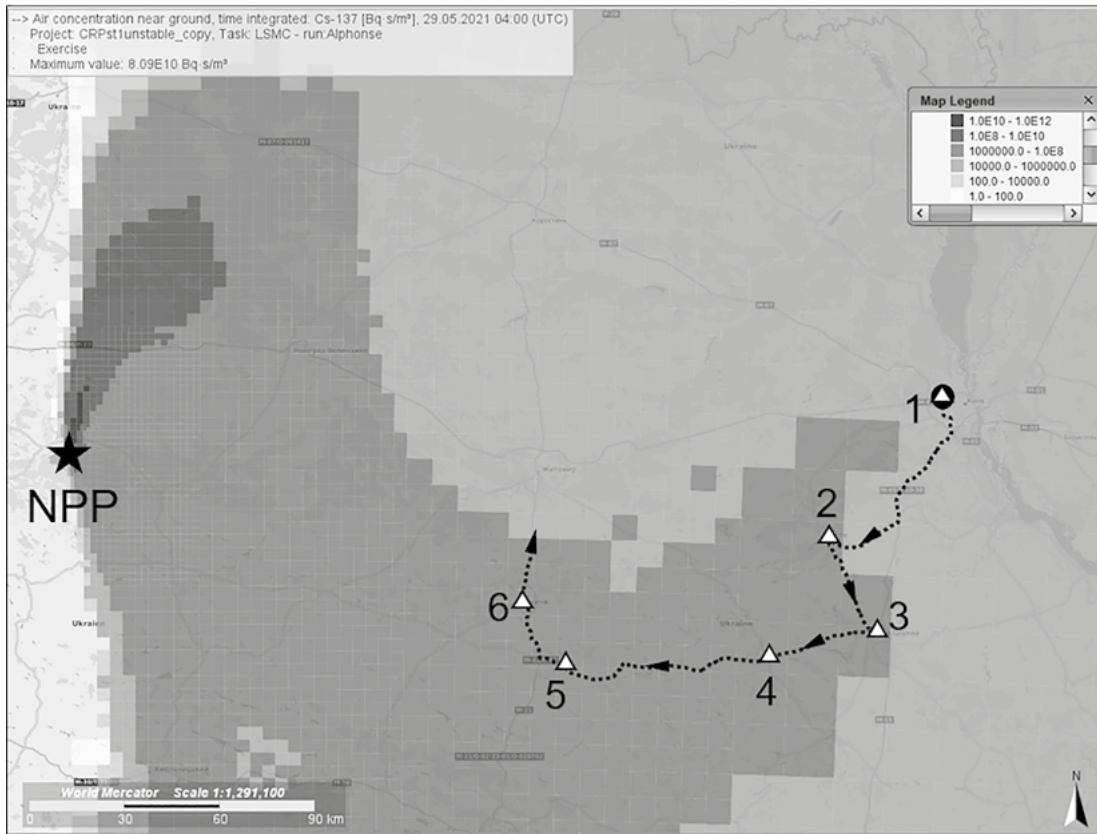


Рисунок 4 – Маршрут МРЛ під час виконання моніторингу для умовного аварійного сценарію № 1 «Теча першого контуру в другий (відрив кришки колектору парогенератора) з повним знеструмленням енергоблока», нестабільна метеорологічна ситуація

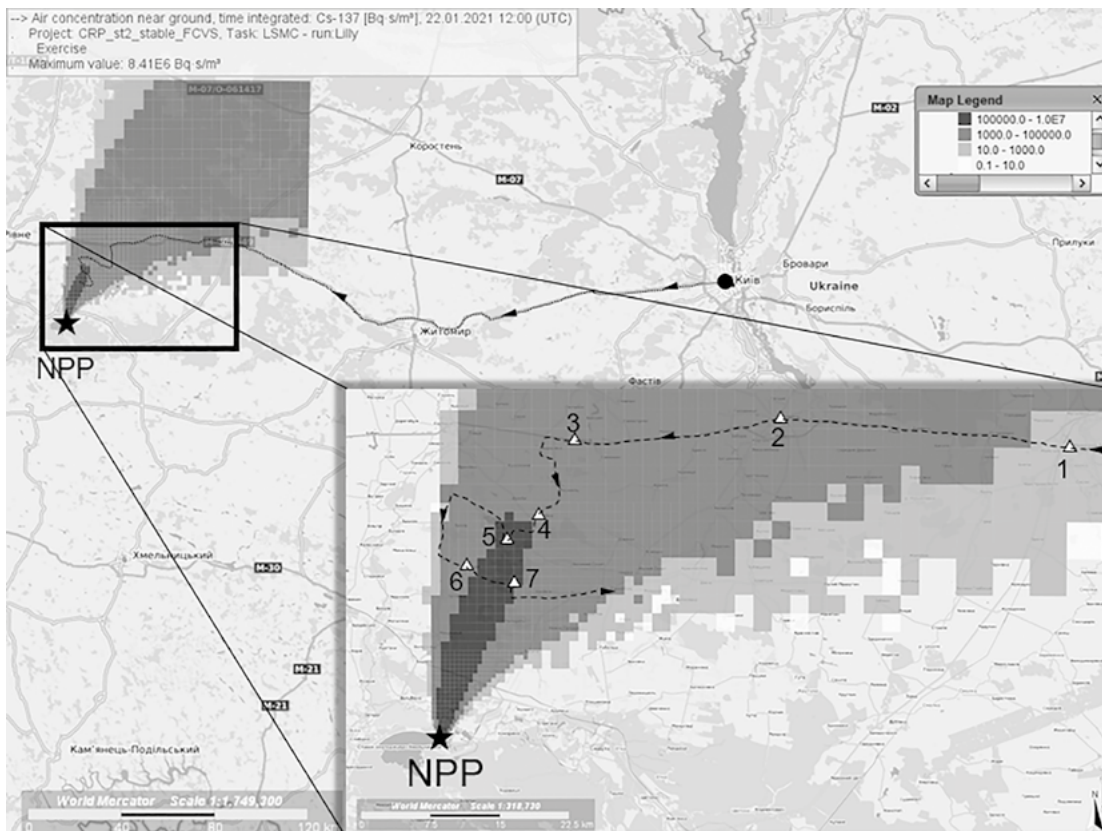


Рисунок 5 – Маршрут МРЛ під час виконання моніторингу для умовного аварійного сценарію № 2 «Повне знеструмлення енергоблока з урахуванням роботи СПСТ», стабільна метеорологічна ситуація



У разі стабільної метеорологічної ситуації та за відсутності опадів маршрут МРЛ пролягає вздовж кордону ДОО (в напрямку від периферії до АЕС) з огляду на значні потенційні дозові навантаження на членів екіпажу МРЛ на шляху наближення до центральної осі факелу. Глибина занурення маршруту в шлейф викиду відносно центральної осі проходження радіоактивної хмари регулюється встановленими рівнями опромінення членів екіпажу МРЛ та визначається на етапі розроблення маршруту.

У разі нестабільних метеорологічних умов та за наявності опадів конфігурації ДОО можуть набувати неоднорідності, значно змінюватися з часом, а отже, впливати на маршрут проведення вимірювань. Тому, ймовірність успішного виконання вимірювань на запланованому маршруті за нестабільних метеорологічних умов суттєво знижується.

У разі фільтрованого викиду спостерігаються значні відмінності у пропорціях між ПЕД та об'ємною активністю радіонуклідів у повітрі порівняно зі сценаріями, що супроводжуються викидом без фільтрації. Ця різниця сягає кількох порядків та, у разі стабільних метеорологічних умов, добре корелює зі ступенем очищення радіоактивної парогазової суміші на фільтраційному обладнанні енергоблока (скруббер СПСТ). Це призводить до відносного розширення ДОО для сценаріїв з фільтрацією парогазової суміші на аварійному енергоблоці внаслідок суттєвого внеску інертних радіоактивних газів у формування ПЕД та зміни критичних шляхів опромінення членів команди МРЛ (зовнішнє та інгаляція).

Незважаючи на те, що роботи в рамках проекту ще тривають, проведені дослідження вже дозволяють сформулювати певні рекомендації та тези щодо сумісного використання СППР та МРЛ:

1. Симуляція сумісної роботи СППР та МРЛ на прикладі декількох репрезентативних випадків та умов реагування під час важкої аварії на АЕС з легководним реактором показала, що моделювання атмосферної дисперсії та прогнозування доз у реальному часі є ефективним механізмом для спрямування та координації роботи МРЛ. Зі свого боку, отримані результати вимірювань є цінним підґрунтям для уточнення побудованих прогнозних моделей та прийняття невідкладних контрзаходів щодо захисту населення.

2. Функціонал сучасних СППР, без відповідної модифікації та кастомізації, повною мірою не забезпечує їх оперативного застосування для визначення маршруту руху лабораторії радіаційного моніторингу. Вбачається доцільним та зручним впровадження у СППР додаткових опцій для автоматичного формування звітів з визначення поточних ДОО за такими критеріями:

поля метеорологічних опадів та інших метеорологічних параметрів, від яких залежить успішність проведення вимірювань та/або відбору проб у вибраній точці;

прогнозовані значення ПЕД, об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$  та інертних радіоактивних газів у приземному шарі атмосфери, щільності поверхневого забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  тощо, що сприятиме успішності проведення вимірювань зважаючи на можливість засобів вимірювальної техніки та додаткового обладнання МРЛ;

неперевищення допустимих рівнів опромінення членів екіпажу МРЛ.

3. Час перерахунку прогнозів атмосферної дисперсії та доз опромінення в СППР є суттєво меншим за тривалість вимірювань в окремій точці та час трансферу між точками. Це означає, що знаходження спеціаліста на позиції експерта з прогнозування радіаційних наслідків як окремого члена екіпажу МРЛ є рекомендованим, але не обов'язковим. Як альтернатива, за умов високої надійності каналів обміну даними, обмін необхідною інформацією щодо прогнозованих значень радіаційної обстановки та результатів вимірювань між екіпажем МРЛ та експертами ІКЦ може відбуватися дистанційно зі встановленою періодичністю або за запитом.

4. Надійність каналів обміну даними може мати обмеження за просторовими та часовими факторами, залежно від розвитку інфраструктури на територіях, що знаходяться в межах зон та відстаней аварійного планування АЕС. Для сумісного використання СППР та МРЛ рекомендується проведення аналізу якості покриття мобільної мережі в зоні розташування потенційних областей моніторингу.

5. Індивідуальна ефективна доза опромінення члена екіпажу МРЛ залежить від фактично використаних засобів індивідуального захисту та встановленого маршруту радіаційного моніторингу. З огляду на існування у ДНТЦ ЯРБ системи обліку індивідуальних доз опромінення працівників, включно з членами екіпажу МРЛ, яка відповідає вимогам ОСПУ-2005 [17], рекомендується автоматизація прогнозування дози опромінення екіпажу МРЛ протягом однієї зміни як захід планування опромінення. Зауважимо, що функціонал широко використовуваних СППР наразі не дозволяє отримати значення інтегральної індивідуальної ефективної дози опромінення за рахунок усіх шляхів на обраному маршруті. У першому наближенні прогнозовані дозові навантаження на членів екіпажу МРЛ можуть бути оцінені на базі прогнозованих значень ПЕД у кожній точці моніторингу. Така практика є необхідною на етапі побудови маршруту з метою планування дозових навантажень на маршрут, а також для членів екіпажу, залучення яких планується під час наступних змін.

6. У разі імплементації запропонованої практики сумісного використання СППР та МРЛ, наявна методична база прогнозування радіаційних наслідків за допомогою СППР (в Україні – Методика підготовки даних та оцінки та прогнозування радіаційних наслідків аварій за допомогою СППР JRODOS ІКЦ [18]) та відповідні інструкції щодо використання МРЛ під час радіаційної аварії повинні бути доповнені зведеними процедурами щодо алгоритмів дій з визначення ДОО моніторингу, алгоритмами комунікації та зв'язку, каналів обміну даними, форматами даних, звітів тощо. Для відпрацювання встановлених процедур експертами, залученими до сумісної діяльності з СППР та МРЛ, рекомендовано проводити регулярні протиаварійні тренування.

## Висновки

Незалежна перевірка дій експлуатуючої організації щодо захисту населення є важливим та невід'ємним етапом на шляху до відкритості та прозорості системи аварійної готовності та реагування на радіаційні аварії на АЕС. Наразі, в межах дослідження МАГАТЕ CRP J15002 представлено перші результати сумісної роботи СППР та МРЛ. На заключних етапах описаного дослідження запланована практична перевірка часу реагування, оптимізація процесу побудови маршруту моніторингу та розробка рекомендацій [10].

Результати цього дослідження стануть підтримкою для майбутніх перевидань документа МАГАТЕ «Загальні процедури моніторингу при ядерній або радіологічній аварійній ситуації» (IAEA-TECDOC-1092) з урахуванням еволюції інструментів прогнозування радіаційних наслідків.

## Список використаної літератури

1. Вишневский Д. А., Зарубина Н. Е., Зарубин О. Л. Радиологический мониторинг лесов в ситуации крупной радиационной аварии. Киев, 2015.
2. Малиновский Б. Н. Академия наук Украины в дни Чернобыльской трагедии. К.: Укртелеком, 2001. 112 с.
3. The Fukushima Daiichi Accident. Technical Volume 3/5. Emergency Preparedness and Response. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2015.
4. The Official Report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission. National Diet of Japan. Tokyo, 2012.
5. Богорад В. И., Литвинская Т. В., Шевченко И. А., Дыбач А. М., Слепченко А. Ю. Радиационные последствия

пожара в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2016. № 1(69). С. 64-68. doi: 10.32918/nrs.2016.1(69).10.

6. Богорад В. І., Белов Я. Ю., Кириленко Ю. О., Литвинська Т. В., Полудненко В. А., Слепченко О. Ю. Прогноз наслідків пожежі в зоні відчуження Чорнобильської АЕС: поєднання апаратних засобів мобільної лабораторії RaniidSONNI та комп'ютерних технологій СППР RODOS. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2018. № 3(79). С. 10-15. doi: 10.32918/nrs.2018.3(79).02.

7. Підсумки щодо радіаційної ситуації у Києві, пов'язаної із лісовими пожежами у Зоні відчуження. Повідомлення на сайті ДНТЦ ЯРБ від 13.04.2020. URL: <https://sstc.ua/news/pidsumki-shodo-radiacijnoyi-situaciyi-u-kiyevi-pov-yazanoyi-iz-lisovimi-pozhezhami-u-zoni-vidchuzhennya>.

8. ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Державні гігієнічні нормативи «Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)».

9. JRodos, Java based RODOS version. Сайт СППР JRODOSURL: <https://resy5.iket.kit.edu/JRODOS/>.

10. 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>.

11. Benchmarking of Fast-running Software Tools Used to Model Releases During Nuclear Accidents, NEA/CSNI/R(2015)19, OECD, 2015. 135 p.

12. Белов Я. Ю., Богорад В. І., Литвинська Т. В., Носовський А. В., Слепченко О. Ю., Трофімова О. Є. Аналіз досвіду використання мобільних лабораторій радіаційного контролю. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2012. № 4(56). С. 53-58. doi: 10.32918/nrs.2012.4(56).12.

13. MELCOR Computer Code Manuals Vol. 1: Primer and Users' Guide, SAND2017-0455 O, 2017. 1170 p.

14. The International Nuclear and Radiological Event Scale (INES), User's Manual, 2008 Edition. Vienna : IAEA, 2013.

15. Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency. TECDOC-1092. Vienna : IAEA, 1999.

16. Google Maps. URL: <https://www.google.com.ua/maps/>

17. ДСП 6.177-2005-09-02. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ОСПУ-2005).

18. Методика підготовки вихідних даних та проведення оцінок і прогнозування радіаційних наслідків аварій за допомогою системи підтримки прийняття рішень РОДОС. К.: ІКЦ Держатомрегулювання, 2018.

## References

1. Vyshnevskiy, D., Zarubina, N., Zarubin, O. (2015). Radiological monitoring of forests in the situation of a major radiation accident, Kyiv.
2. Malynovskyi B. (2001). Academy of Sciences of Ukraine in the days of the Chornobyl tragedy. Ukrtelecom, 112 p.

3. The Fukushima Daiichi accident. Technical volume 3/5. Emergency preparedness and response. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2015.

4. The official report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, National Diet of Japan, Tokyo, 2012.

5. Bohorad, V., Lytvynska, T., Shevchenko, I., Dybach, O., Slepchenko, O. (2016). Radiological consequences of wildfire in the Chernobyl exclusion zone. *Nuclear and Radiation Safety*, 1(69), 64-68. doi: 10.32918/nrs.2016.1(69).10.

6. Bogorad, V., Bielov, Y., Kyrylenko, Y., Lytvynska, T., Poludnenko, V., Slepchenko, O. (2018). Forecast of the consequences of a fire in the Chernobyl exclusion zone: a combination of the hardware of the mobile laboratory RANIDSONNI and computer technologies DSS RODOS. *Nuclear and Radiation Safety*, 3(79), 10-15. doi: 10.32918/nrs.2018.3(79).02.

7. Summary on the radiological situation in Kyiv associated with forest fires in the exclusion zone. Message on the SSTC NRS web-site of 13 April 2020. Retrieved from <https://sstc.ua/news/pidsumki-shodo-radiacijnoyi-situaciyi-u-kiyevi-pov-yazanoyiz-lisovimi-pozhezhami-u-zoni-vidchuzhennya>

8. DGN 6.6.1.-6.5.001-98. Radiation safety standards of Ukraine (NRBU-97).

9. JRodOS, Java based RODOS version. JRODOS DSS website <https://resy5.iket.kit.edu/JRODOS/>.

10. 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>.

11. Benchmarking of fast-running software tools used to model releases during nuclear accidents. NEA/CSNI/R(2015)19, OECD, 2015, 135 p.

12. Bielov, Ya., Bogorad, V., Lytvynska, T., Nosovskyi, A., Slepchenko, A., Trofimova E. (2012). Analysis of experience in using mobile radiological laboratories. *Nuclear and Radiation Safety*, 4(56), 53-58. doi: 10.32918/nrs.2012.4(56).12.

13. MELCOR computer code manuals. Volume 1. Primer and users' guide. SAND2017-0455 O, 2017, 1170 p.

14. The International Nuclear and Radiological Event Scale (INES). User's manual. 2008 edition, IAEA, Vienna, 2013.

15. TECDOC-1092. Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency, IAEA, 1999

16. Google Maps. <https://www.google.com.ua/maps/>

17. DSP 6.177-2005-09-02. Basic radiation safety rules of Ukraine (OSPU-2005).

18. The methodology for preparing input data, conducting calculations and forecasting of radiological consequences using decision support system RODOS. IEC SNRIU, Kyiv, 2018.

## Joint Use of Mobile Radiological Laboratory and Decision Support System as an Effective Approach to Emergency Monitoring

**Yu. Balashevskaya, M. Demchenko,  
Yu. Kyrylenko, O. Kotsuba, O. Pecherytsa,  
I. Shevchenko**

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

Radiation measurements and rapid analysis of contamination on areas around a nuclear power plant (NPP) in case of a severe accident are the best options to facilitate the decision-making process related to radiological hazards, in particular, for taking adequate actions to protect emergency workers, as well as for emergency countermeasures to protect the public. However, procedures for quick sampling and in-situ measurements are associated with practical difficulties, such as hazardous radiological conditions, limited time for data collection, etc.

To make decisions on some protective measures at the initial stages of the emergency response, it may be sufficient to get the results of modelling the air transfer of radioactive substances based on the simulation of a certain scenario. In order to improve the accuracy of modelling and provide a reliable ground for data interpretation, it is considered reasonable to perform simultaneous radiation mapping and air sampling using a mobile laboratory in the areas adjacent to the location of a source term.

Available IAEA methodologies and recommendations allow improvement in the capabilities of up-to-date modelling tools. This paper contributes to the development of a methodology for joint use of a decision support system and a mobile laboratory for the real-time emergency environmental monitoring around NPPs. The studies were undertaken within IAEA coordinated research project CRP J15002 and concern the use of RANIDSONNI mobile laboratory and the European decision support system RODOS. The SSTC NRS recent experience of confirming the modelling results with the real measurement data provided by the mobile laboratory during the response to wildfires in the Chernobyl exclusion zone during the past years is used.

Keywords: emergency monitoring, mobile radiological laboratory, severe accident, decision support system.

Отримано 04.02.2022