

УДК 528.9

І.В. КОВАЛЕЦЬ*, Є.О. ЄВДІН**, Р.О. СИНКЕВИЧ*, О.І. УДОВЕНКО*

**МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ АВАРІЙ НА АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ
З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ РОДОС**

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**Федеральне відомство з радіаційного захисту, м. Берлін, ФРН

Анотація. У роботі розглянуто набір сценаріїв потенційних наслідків важких техногенних аварій на українських АЕС. На підставі класифікації метеорологічних умов розповсюдження атмосферного забруднення проведено моделювання наслідків аварій на прикладі Рівненської АЕС для типових метеорологічних сценаріїв та оцінено максимальні можливі рівні радіоактивного забруднення. Результати розрахунків продемонстрували можливість використання моделювання для розрахунку ризиків для населення в зонах впливу українських АЕС з урахуванням географічних особливостей місцевості, розподілу населення та метеорологічної обстановки в період аварії.

Ключові слова: радіаційна аварія, метеорологічні умови, ризики для населення.

Аннотация. В работе рассмотрен набор сценариев тяжелых техногенных аварий на украинских АЭС. На основании классификации метеорологических условий распространения атмосферного загрязнения проведено моделирование последствий аварий на примере Ровенской АЭС для типичных метеорологических сценариев и оценены максимальные возможные уровни радиоактивного загрязнения. Результаты расчетов показали возможность использования моделирования для расчета рисков для населения в зонах влияния украинских АЭС с учетом географических особенностей местности, распределения населения и метеорологической обстановки в период аварии.

Ключевые слова: радиационная авария, метеорологические условия, риски для населения.

Abstract. A set of scenarios for severe accidents at Ukrainian NPPs is considered in the work. Based on the classification of meteorological conditions related to the distribution of atmospheric pollution, the simulations of the consequences of accidents were made using the example of Rivne NPP for typical meteorological scenarios and the maximum possible levels of radioactive contamination were estimated. The results of calculations showed the possibility of using modeling to calculate risks for the population in the zones of influence of Ukrainian NPPs, taking into account the geographic features of the terrain, the distribution of the population and the meteorological situation during the accident.

Keywords: radiological accident, meteorological conditions, risks for the population.

1. Вступ

Протягом 2013–2016 рр. в Україні впроваджено комплексну систему Євросоюзу для позаоб'єктного реагування в реальному часі на ядерні аварії РОДОС (<https://resy5.iket.kit.edu/RODOS>). Система РОДОС була розроблена в проектах 3–7-ї Рамкових програм Європейської комісії з залученням кількох десятків наукових організацій з країн Європи, у тому числі й з України [1]. Система призначена в першу чергу для оперативного реагування у випадку аварій на атомних електростанціях (АЕС), але може бути використана і в режимі офлайн для оцінки ризиків для населення внаслідок можливих аварійних ситуацій на АЕС.

На етапі впровадження системи РОДОС в Україні у системі було інтегровано сценарії аварійних викидів з реакторів VVER1000 та VVER440 Рівненської та Запорізької АЕС, розроблені у роботі [2], з урахуванням досвіду аварії на АЕС Фукусіма. Представлені сценарії важких аварій можуть бути проаналізовані системою РОДОС у комбінації з аналі-

зом можливих метеорологічних ситуацій для розрахунку відповідних наслідків для населення.

Метою даної роботи є дослідження можливості системи РОДОС для аналізу ризиків, пов'язаних з важкими аваріями на АЕС.

До цього часу в Україні було лише декілька робіт, присвячених аналізу всебічних наслідків для населення важких аварій на АЕС. У роботі [3] зроблено таку спробу, але при цьому використано вигаданий метеорологічний сценарій, в якому користувачем задавались швидкість та напрям вітру біля поверхні Землі, інтенсивність опадів, категорій стійкості тощо. Використання подібних спрощених сценаріїв виправдане лише для аналізу наслідків у ближній зоні навколо АЕС (до 30 км, [4]). На відміну від попередньої, у даній роботі будуть використані результати моделювання погодних умов, отримані з використанням метеорологічної моделі WRF-Україна [5], що дозволяє враховувати реальну просторову та часову мінливість метеорологічних полів навколо АЕС. Виконання всебічної оцінки ризиків виходить за рамки однієї статті. Але у роботі зроблено першу спробу виконати всебічне моделювання наслідків важких аварій на прикладі Рівненської АЕС (РАЕС) на основі аналізу реальних метеорологічних ситуацій.

2. Сценарій викиду

Для розрахунків використовувався такий сценарій викиду внаслідок гіпотетичних важких аварій на РАЕС, розроблений НАЕК Енергоатом із урахуванням досвіду аварії на АЕС Фукусіма (Енергоатом, 2012): повне знеструмлення з накладенням втрати кінцевого поглинача тепла для енергоблоків № 1 та № 2 РАЕС (VVER-440).

Часові залежності викиду, розраховані для сценарію на підставі даних, наведених у [2], а також даних про інвентори відповідних реакторів, наявних у базах даних системи РОДОС, були інтегровані в систему РОДОС та показані на рис.1. Інтегральні характеристики викиду: тривалість 64 год, сума благородних газів – $5 \cdot 10^{17}$ Бк, сумарний викид йоду – $3.4 \cdot 10^{17}$ Бк, сумарний викид аерозолів – $1.3 \cdot 10^{17}$ Бк.

3. Метеорологічні сценарії

Значна (майже 3 доби) тривалість викидів, розглянутих у попередньому пункті, ускладнює типізацію викидів за характерними аеросиноптичними умовами, оскільки за час викиду аеросиноптичні умови здатні істотно змінитись. Обґрунтуванням для використання методу типізації викидів за аеросиноптичними умовами у даному випадку може служити те, що, згідно з графіками, представленими на рис. 1, основна частина викиду відбувається лише в перші 12 годин аварії.

Внаслідок великого різноманіття синоптичних ситуацій і їхньої великої мінливості, у деяких роботах для класифікації атмосферного розповсюдження синоптичні ситуації зводяться до двох найбільш значних щодо наслідків аварії класів [6]: «виносу» і «осадження» забруднюючих речовин. У рамках цих класів сценарії розділяють за характером випадіння на: 1) винос з опадами («вологий винос»); 2) винос без опадів («сухий винос»); 3) застій з опадами («вологий застій»); 4) застій без опадів («сухий застій»). Але навіть така широка класифікація є надзвичайно умовною, оскільки, як буде показано нижче, при окремих умовах сухе осаждення може досягати такої самої інтенсивності, як і вологе осаждення.

Попри усі умовності, існують певні синоптичні умови, які можуть характеризуватися як особливо небезпечні з точки зору переносу атмосферного забруднення. Слід виділити такі ситуації:

1. Квазістаціонарне поле підвищеного тиску над сніжною поверхнею, коли надзвичайно стійка стратифікація поєднується зі штилевими умовами.

2. Квазістаціонарне поле підвищеного тиску у теплий період року (або в холодний період року, але у поєднанні із теплою та вологою повітряною масою), коли штилеві умови можуть поєднуватися зі значним рівнем турбулентності, що приводить до значних сухих випадінь.

3. Проходження активного циклону в період викиду, що призводить до значних вологих випадінь і забруднення території.

4. Проходження фронту в період викиду, що призводить до великої території забруднення внаслідок повороту вітру.

У відповідності з зазначеними вище міркуваннями для моделювання були відібрані такі дати 2013 року: а) 10 грудня 2013 р. – застій внаслідок поля високого тиску, нейтральна стратифікація, сухе осадіння; б) 27 лютого 2013 р. – поле високого тиску, застій, стійка стратифікація, великі концентрації у повітрі; в) 6 грудня 2013 р. – тильна частина циклону, винос досить сильним вітром (до 10 м/с); г) 28 липня 2013 р. – поле високого тиску, поєднане з нестійкою стратифікацією, значні значення сухих випадінь.

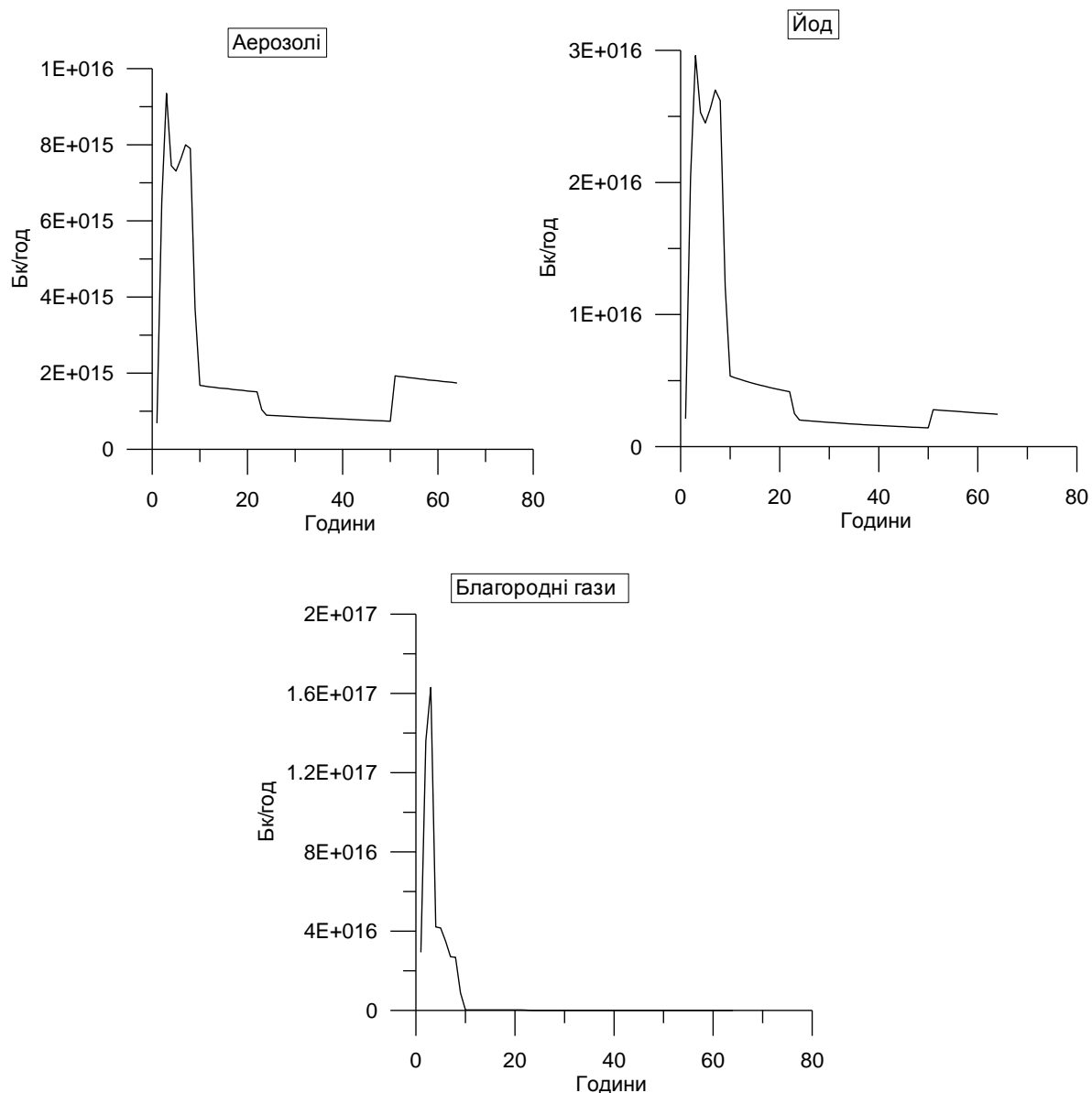


Рис. 1. Часова динаміка викиду радіонуклідів для сценарію аварії на РАЕС

4. Результати розрахунків

Розрахунки метеорологічних сценаріїв були проведені з використанням моделі WRF (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users>), налаштованої для деталізації метеорологічних полів навколо РАЕС з просторовим дозволом 5 км [5]. Максимальні концентрації та щільності випадінь для кожного з розрахунків представлені у табл. 1. Як видно з даних, приведених у таблиці, найгіршим метеорологічним сценарієм (найбільша інтегральна концентрація) є сценарій 27 лютого («застій») без значних випадінь, рис. 2). Це підтверджується також і тим, що не тільки інтегральна концентрація (рис. 3), але й території контрзаходів (рис. 4), розраховані для цього сценарію, та зони детермінованих ефектів найбільші саме для цього сценарію. Сценарій «виносу» від 6 грудня 2013 р. не приводить до значних наслідків навколо станції, але внаслідок транскордонного переносу значні потужності доз виникають на значних відстанях від кордону України – на півночі Білорусії, а випадіння охоплюють також і значну територію європейської частини Росії.

Таблиця 1. Максимальні інтегральні концентрації та щільності випадінь внаслідок викидів на РАЕС при різних метеорологічних сценаріях

Сценарій	Дата викиду	Максимальна інтегральна концентрація, Бк·с/м ³	Максимальне випадіння, Бк/м ²
А	10 грудня 2013	9.5E10	2.6E9
Б	27 лютого 2013	1.8E11	1.35E7
В	6 грудня 2013	3.5E10	8.8E7
Г	28 липня 2013	2.8E10	1.2E8

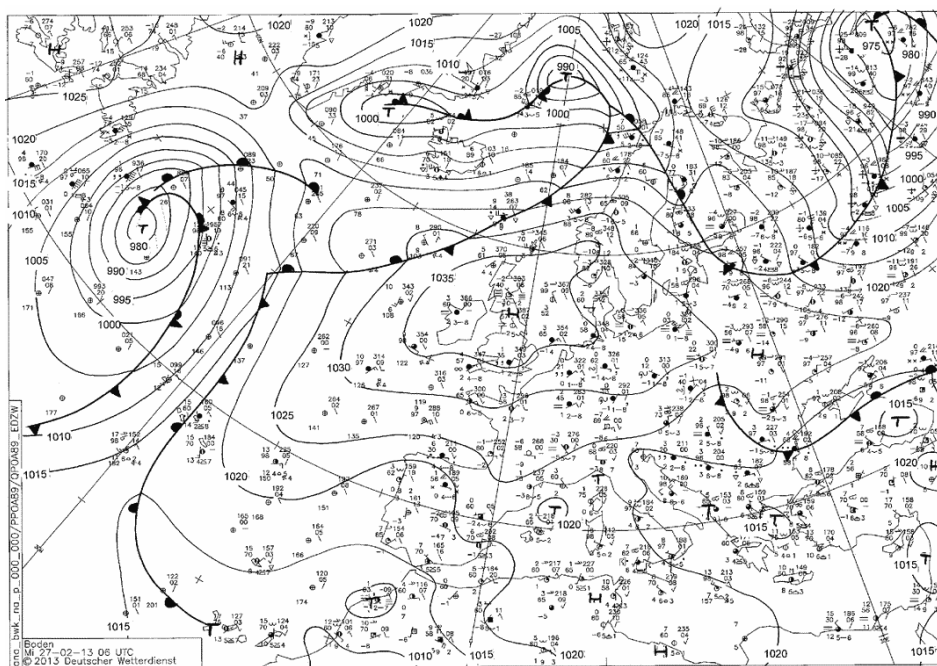


Рис. 2. Синоптична ситуація 27 лютого 2013 р. за даними Німецької служби погоди (www2.wetter3.de)

Оцінки довгострокових доз та концентрацій у продуктах харчування були виконані модулем FDMT системи РОДОС, який був адаптований для умов України згідно з роботами [3, 7]. Зокрема, у роботах [1, 2] територія України була розділена на п'ять радіоекологічних регіонів (полісся, лісостеп, степ, Карпати та Кримські гори) і для кожного регіону визначено та заведено в систему відповідні параметри радіоекологічних моделей. Часові і

просторові залежності концентрації у продуктах харчування для сценарію від 27 лютого 2013 р. показані на рис. 5. Часова залежність концентрації у молоці має два піки внаслідок того, що корови взимку харчуються зараженим сіном, зібраним у літній період. Приклади відповідних довгострокових доз показані на рис. 6, 7.

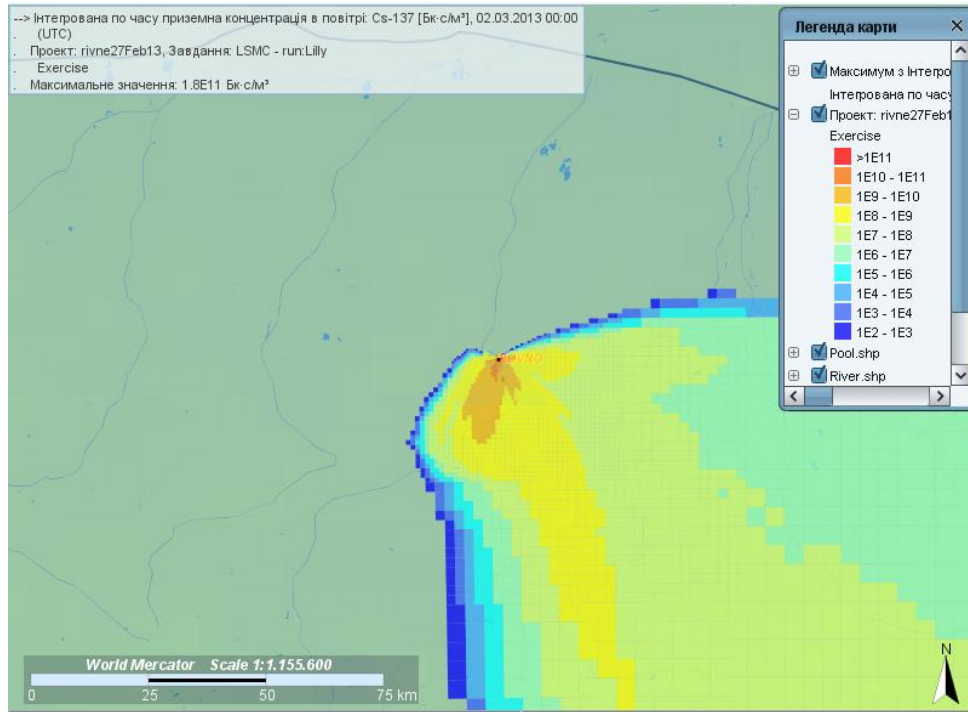


Рис. 3. Інтегральна концентрація Cs-137 навколо РАЕС для сценарію гіпотетичного викиду від 27 лютого 2013 р.

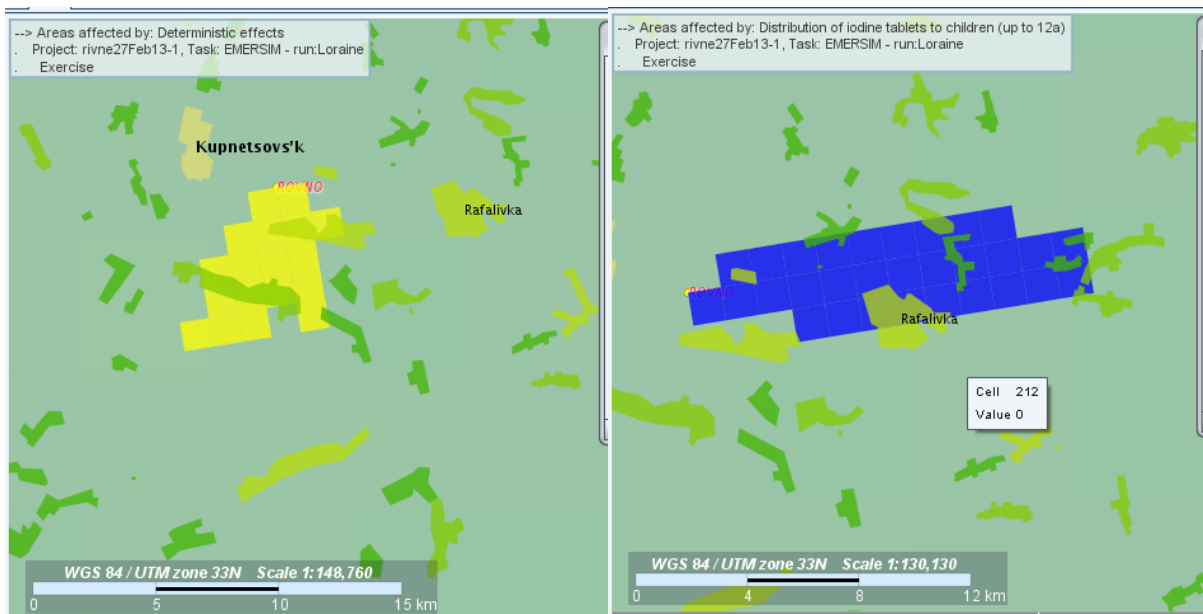


Рис. 4. Територія детермінованих ефектів (зліва) та території рекомендованої йодної профілактики для дітей (справа) навколо РАЕС внаслідок гіпотетичного викиду при метеорологічних умовах від 27 лютого 2013 р.

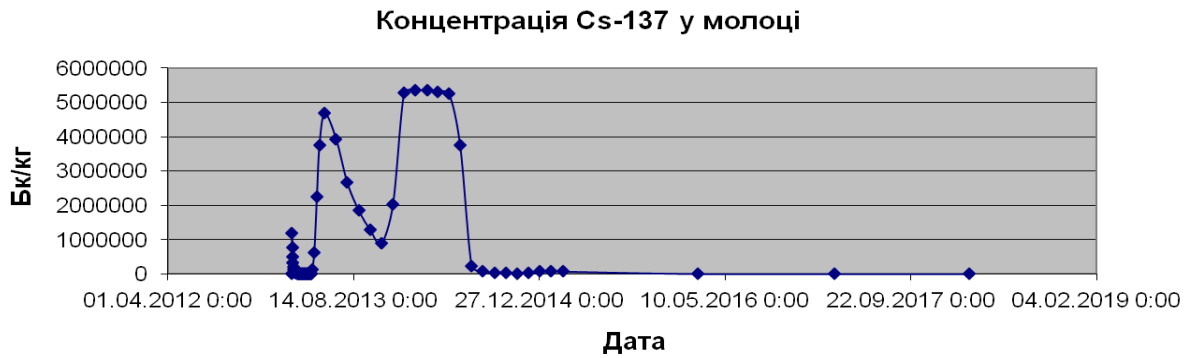


Рис. 5. Часова залежність концентрації Cs-137 у молоці (зверху) та у житі (знизу) біля РАЕС у точці з максимальним забрудненням поверхні внаслідок гіпотетичного викиду при метеорологічних умовах від 27 лютого 2013 р.

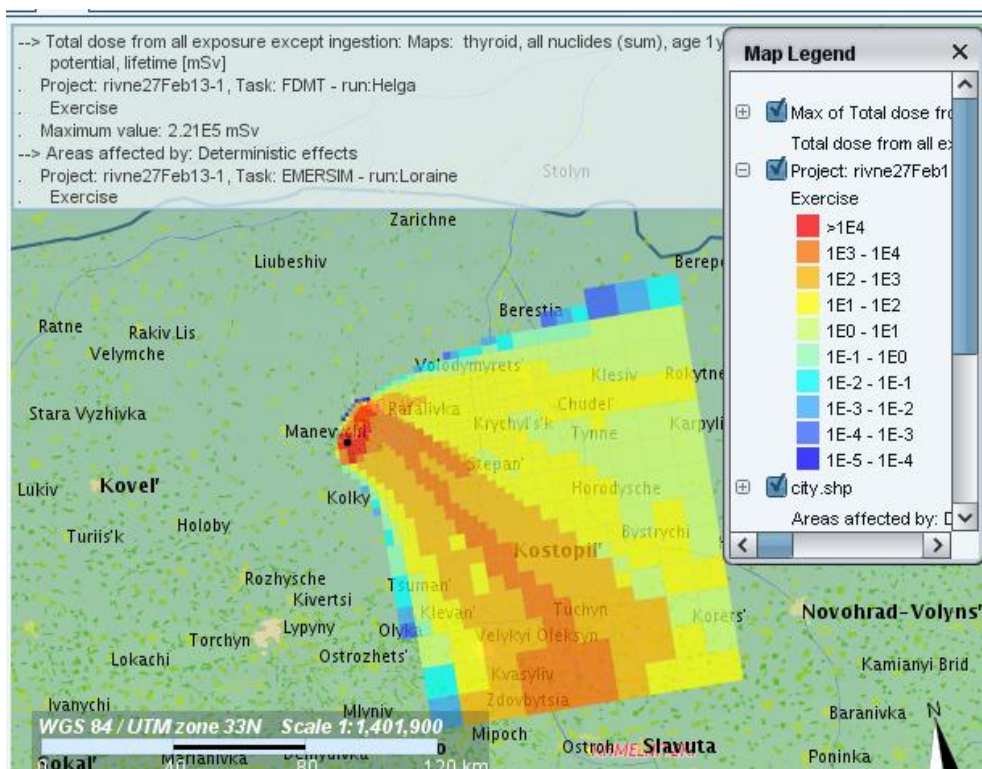


Рис. 6. Просторовий розподіл сумарної ефективної дози від усіх шляхів, крім харчування, на щотижневну залозу для дітей за увесь період життя внаслідок гіпотетичного викиду на РАЕС при метеорологічних умовах від 27 лютого 2013 р.

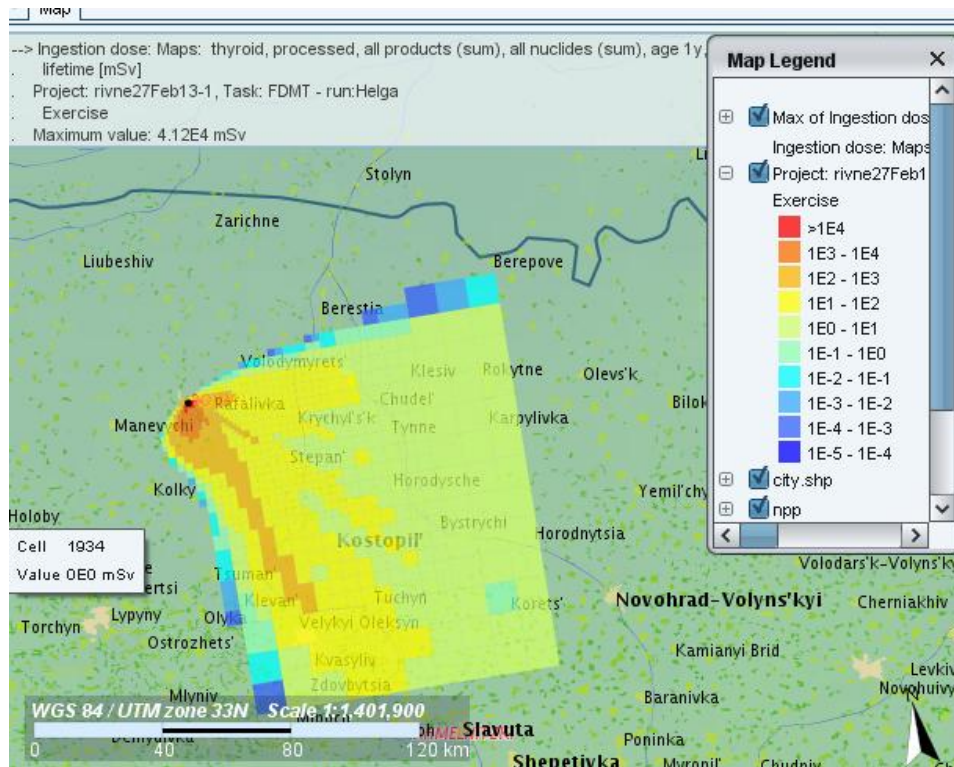


Рис. 7. Просторовий розподіл сумарної ефективної дози від продуктів харчування на щитовидну залозу для дітей за увесь період життя внаслідок гіпотетичного викиду на РАЕС при метеорологічних умовах від 27 лютого 2013 р.

5. Висновки

У роботі розглянуто набір сценаріїв важких техногенних аварій на українських АЕС. На підставі класифікації метеорологічних умов розповсюдження атмосферного забруднення проведено моделювання наслідків аварій на прикладі Рівненської АЕС для типових метеорологічних сценаріїв та оцінено максимальні можливі рівні радіоактивного забруднення. Розраховані сценарії радіаційних аварій продемонстрували можливість як оперативного прогнозування наслідків радіаційних аварій, так і можливості використання моделювання для розрахунку ризиків для населення в зонах впливу українських АЕС у випадках важких ядерних аварій з урахуванням географічних особливостей місцевості, розподілу населення та метеорологічної ситуації в період аварії. Отримані результати складають підґрунтя для подальших досліджень з оцінки та мінімізації ризиків, пов'язаних з важкими техногенними аваріями на АЕС України. Оскільки для довготривалих викидів дуже важко класифікувати синоптичні умови за їх впливом на радіоактивне забруднення, в подальших дослідженнях слід використовувати екстенсивні розрахунки системою РОДОС для великої кількості метеорологічних сценаріїв з метою отримання статистично достовірних оцінок щодо просторового розподілу максимальних можливих доз для населення в результаті аварій. Розраховані результати можуть також використовуватися для попередньої оцінки наслідків зазначених вище природних та техногенних надзвичайних ситуацій в Україні.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. RODOS re-engineering: aims and implementation details / I. Ievdin, D. Trybushny, M. Zheleznyak [et al.] // Radioprotection. – 2010. – Vol. 45, N 5. – S181 – S189.
2. Дополнительная целевая переоценка безопасности энергоблоков ОП РАЭС с учетом уроков, извлеченных из аварии на АЭС Фукусима-1. – К.: НАЭК «Енергоатом», 2012.

3. Assessment of doses for scenarios of accidental releases from Zaporizhje Nuclear Power Plant using RODOS system [Електронний ресурс] / A. Dvorzhak, I. Kovalets, V. Koshebutsky [et al.] // Proc. of Int. Congr. «11th International Congress of the International Radiation Protection Association», (Madrid, Spain, 23–28 May 2004). – Spain, Madrid: Spanish Radiation Protection Soc. – Режим доступу: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/irpa/2004/files/7a9.pdf>.
4. Талерко Н.Н. Физические особенности и ограничения моделей атмосферного переноса радионуклидов для разных пространственно-временных масштабов / Н.Н. Талерко // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2009. – № 11. – С. 57 – 62.
5. Халченков А.В. Адаптація метеорологічної моделі WRF для прогнозування полів вітру навколо Рівненської АЕС / А.В. Халченков, І.В. Ковалець, О.М. Романенко // Математичні машини і системи. – 2015. – № 1. – С. 130 – 138.
6. Сонькин Л.Р. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы / Сонькин Л.Р. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 223 с.
7. Dvorzhak A. Documentation on the two INCO working programs: «Review of the adequacy of the present food chain and dose calculations» and «Collection of the data required for each radioecological region and their integration» /A.I. Dvorzhak // RODOS Report (WG3)-TN(99)-04 Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, 1999. – 178 p.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2018