

КАМЕРНА МОДЕЛЬ ЧОРНОГО МОРЯ ТА ЇЇ ІНТЕГРАЦІЯ В ЄВРОПЕЙСКУ СИСТЕМУ З ЯДЕРНОГО АВАРІЙНОГО РЕАГУВАННЯ RODOS

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

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

***Природничо-технічний факультет Університету міста Зіген, м. Зіген, ФРН

Анотація. Камерна модель POSEIDON-R була інтегрована в Європейську систему з ядерного аварійного реагування RODOS. Розроблено процедуру автоматичної передачі даних атмосферного випадіння на поверхню моря, розрахованого Модулем атмосферного переносу, та потоку радіонуклідів з річковою водою, розрахованого моделлю RIVTOX, в модель POSEIDON-R в рамках системи RODOS. Створено нову детальну систему камер Чорного моря для моделі POSEIDON-R. Реалізовано ланцюжок моделей, що включає атмосферний перенос умовного викиду радіоактивного ^{90}Sr з АЕС Чорновода (Румунія), його випадіння на землю, стік у річкову систему Дунаю і перенос у Чорне море, а також представлено довгостроковий прогноз забруднення морського середовища.

Ключові слова: Чорне море, камерна модель POSEIDON-R, система RODOS.

Аннотация. Камерная модель POSEIDON-R была интегрирована в Европейскую систему по ядерному аварийному реагированию RODOS. Разработана процедура автоматической передачи данных атмосферного выпадения на поверхность моря, рассчитанного Модулем атмосферного переноса, и потока радионуклидов с речной водой, рассчитанного моделью RIVTOX, в модель POSEIDON-R в рамках системы RODOS. Создана новая детальная система камер Черного моря для модели POSEIDON-R. Реализована цепочка моделей, которая включает атмосферный перенос условного выброса радиоактивного ^{90}Sr с АЭС Черновода (Румыния), его выпадения на землю, сток в речную систему Дуная и перенос в Черное море, а также представлен долгосрочный прогноз загрязнения морской среды.

Ключевые слова: Черное море, камерная модель POSEIDON-R, система RODOS.

Abstract. The box model POSEIDON-R was integrated into European Decision Support System for nuclear emergency response RODOS. The software interfaces were developed for the automatic transfer of atmospheric fallout on the sea surface, calculated by Atmospheric Dispersion Module, as well as flux of radionuclides with river waters, calculated by RIVTOX model, into the POSEIDON-R model inside the RODOS system. The new detailed box system for the Black Sea was created for the POSEIDON-R model. The linkage of models that describes atmospheric dispersion of radioactive ^{90}Sr and its deposition on the land, washout from the Danube watershed, transport of radionuclide through the river into the sea, and long-term contamination of marine environment of the Black Sea was realized for the stress test scenario of the atmospheric release from the Chernovoda NPP (Romania).

Keywords: Black Sea, box model POSEIDON-R, RODOS system.

1. Вступ

Європейська система з ядерного аварійного реагування RODOS [1] була створена після аварії на Чорнобильській АЕС в рамках проектів Європейського Союзу. З самого початку система RODOS включала гідромодуль, чії компоненти (одновимірна модель RIVTOX, двовимірна модель COASTOX і тривимірна модель THREEOX) забезпечували можливість прогнозування короткострокового переносу радіонуклідів у різних водоймах: річках, озерах, водосховищах, лиманах і прибережних зонах морів. Проте після аварії на АЕС Фукусіма виникла необхідність розширити гідромодуль камерною моделлю POSEIDON-R для прогнозування довгострокового переносу радіонуклідів у морському середовищі, у тому числі в морських організмах. Для цього було розроблено процедуру автоматичної передачі даних атмосферного випадіння на поверхню моря, розрахованого Модулем атмо-

ферного переносу як джерела радіоактивності в моделі POSEIDON-R в рамках системи RODOS. Для розрахунку морського забруднення в результаті річкового стоку модель POSEIDON-R була поєднана з одновимірною моделлю переносу радіонуклідів по річковій мережі RIVTOX.

Детальний опис моделі POSEIDON-R наведений у роботі [2]. Тестування моделі проводилось на прикладі розрахунку розповсюдження радіоактивних цезію ^{137}Cs і стронцію ^{90}Sr у морському середовищі північно-західної частини Тихого океану після аварії на АЕС Фукусіма [3–5].

Дана робота присвячена опису розроблених процедур і прикладу застосування моделі POSEIDON-R під оболонкою системи RODOS. У роботі реалізовано ланцюжок моделей, що включає атмосферний перенос умовного викиду радіонуклідів з АЕС Чорнобода (Румунія), його випадіння на землю, стік у річкову мережу і перенос у Чорне море, а також довгостроковий прогноз забруднення морського середовища.

2. Нова система камер Чорного моря для моделі POSEIDON-R

Модель POSEIDON-R описує морське середовище як систему камер, що включають товщу води, донні відкладення і морські організми [6]. Кожна з камер у моделі може містити будь-яку кількість шарів води, забезпечуючи, таким чином, тривимірність системи. Також камери містять зважені намули, що рівномірно осідають на дно. В моделі вважається, що радіонукліди, адсорбовані зваженими частинками, знаходяться в рівновазі з розчиненими радіонуклідами. Перенос розчинених радіонуклідів між камерами описується процесами адвекції і дифузії. Переміщення осаджених радіонуклідів у дні описується за допомогою тришарової системи, в якій верхній шар взаємодіє з водою, між верхнім і середнім шаром відбувається дифузія радіонуклідів, а все, що потрапило в нижній шар у результаті осідання, вже ніколи не повертається наверх.

У даній роботі була створена система камер для Чорного моря (рис. 1). Вона включає 45 камер у самому морі, а також 5 камер, що відповідають за Середземне, Мармурове та Азовське моря і Дніпро-Бузький лиман. У моделі враховуються 2 основні річки регіону: Дунай і Дніпро, що забезпечує баланс води в морі. Оскільки в басейні Чорного моря знаходяться 37 діючих атомних реакторів, то врахування річок є необхідним для опису потенційного радіаційного забруднення моря через водні шляхи.

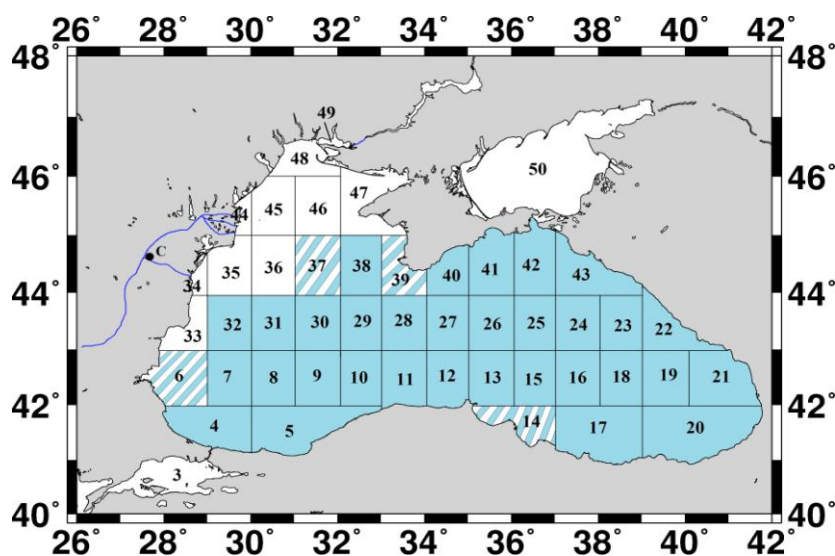


Рис. 1. Система камер Чорного моря. Камери з різною кількістю вертикальних шарів у товщі води мають різні відтінки. Положення АЕС Чорнобода позначене літерою «С»

Об'єм і середня глибина кожної камери розраховувались на основі даних про глибини, що використовуються в розрахунках Європейської моделі океану NEMO, які знаходяться у вільному доступі [7]. Глибокі області були поділені на вертикальні шари для кращого описання вертикального і горизонтального переносу активності у поверхневому шарі (від поверхні до глибини 25 м), верхньому шарі (25–100м), середньому шарі (100–600м) і нижньому шарі (понад 600 м). Поверхневий шар було введено для опису високої концентрації радіонуклідів у перші місяці після потраплення забруднення в море. На рис. 1 глибокі камери з 4 вертикальними шарами позначені темним відтінком, камери з 3 вертикальними шарами виділені темними смужками, а мілководні камери лише з двома верхніми шарами позначені білим кольором. Потоки води між камерами були розраховані методом усереднення за 10 років (2006–2015) тривимірних течій, отриманих чисельною моделлю NEMO з використанням даних реаналізу [7]. Враховувались також потоки води з річок Дунаю (202 км³/рік) і Дніпра (53 км³/рік) та обмін водою з Азовським і Мармуровим морями.

Була проведена оцінка точності розрахунків за допомогою моделі POSEIDON-R в Чорному морі шляхом порівняння результатів моделювання з вимірами концентрації ¹³⁷Cs у поверхневому шарі моря за період часу з 1978 по 2011 рр. Основними джерелами радіоактивного забруднення Чорного моря були глобальне випадіння радіонуклідів у результаті випробувань атомної зброї всередині XX століття та аварія на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС) 1986 року. Величину глобального випадіння ¹³⁷Cs на камери Чорного моря було визначено на основі щорічних даних густини випадіння на поверхню планети між 40 і 50 градусами північної широти [8]. Що стосується випадіння після аварії на ЧАЕС, то, згідно з оцінками [9], атмосферне випадіння на поверхню Чорного моря у травні 1986 року склало 1700–2400 ТБк ¹³⁷Cs. Розподіл даного випадіння між камерами було здійснено на основі карти забруднення поверхневого шару Чорного моря [10]. Також враховувався притік ¹³⁷Cs з водами річок Дніпра і Дунаю в 1986–2000 рр.

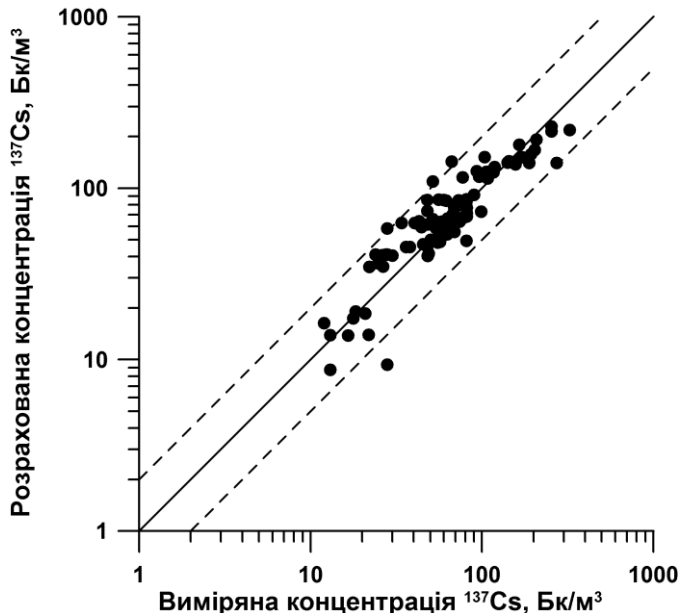


Рис. 2. Кореляція між розрахованими і виміряними значеннями концентрації ¹³⁷Cs у воді (в усіх камерах Чорного моря) за період з 1980 по 2011 рр. Штриховими лініями позначене відхилення у 2 рази

В цілому, порівняння розрахунків з вимірами [11, 12] у всіх камерах Чорного моря за весь розрахунковий період показане на рис. 2. Коефіцієнт кореляції становить 0,91. Деяке неспівпадіння може пояснюватись неточністю задання джерел забруднення, оскільки не існує достовірної інформації про розподіл атмосферного випадіння на Чорне море після аварії на ЧАЕС, а в роботі він задавався на основі часткових даних про концентрацію радіонукліду в поверхневому шарі моря [10]. Також варто відмітити, що модель розраховує середні значення концентрації в кожній камері, тоді як виміри проводилися в конкретних точках, а потім проводилося арифметичне усереднення значень в областях моря, які

відповідають камерам моделі, що могло привести до певних розбіжностей.

3. Інтеграція моделі POSEIDON-R у систему RODOS

У розробці комплексної системи підтримки прийняття рішень RODOS, починаючи з 1989 року, брали участь наукові інститути з 20 європейських країн, у тому числі Інститут проблем математичних машин і систем НАН України. Дана система може використовуватися в національних чи регіональних ядерних аварійних центрах для забезпечення послідовної підтримки на всіх стадіях надзвичайної ситуації, зокрема, безпосередньо під час витoku радіоактивних речовин та після нього, включаючи етап довгострокового управління та відновлення забруднених міських і сільськогосподарських районів. Система може здійснювати підтримку рішень про застосування широкого спектра потенційно корисних контрзаходів, таких як евакуація населення, розповсюдження йодованих таблеток, заборону на вживання певних типів їжі, сільськогосподарські контрзаходи, переселення, дезактивація, відновлення та ін., метою яких є пом'якшення наслідків надзвичайної ситуації по відношенню до здоров'я людини, економіки регіону та стану навколишнього середовища. Застосування системи RODOS може здійснюватись як у випадку викиду радіонуклідів в атмосферу, так і для витoku у різноманітні водні об'єкти. В системі розроблені спеціальні інтерфейси для поєднання місцевих та національних даних радіологічного моніторингу, вимірів метеорологічних параметрів та систем чисельного прогнозу погоди, а також для адаптації баз даних до місцевих, регіональних та національних умов в Європі.

Система RODOS включає кілька моделей атмосферного переносу: локальну модель LSMC, що бере за основу дані моделей ATSTEP [13], RIMPUFF [14], DIPCOT [15] чи LASAT [16], а також глобальну модель MATCH [17]. Результатом розрахунків цих моделей є сухе та вологе атмосферне випадіння радіонуклідів на підстилаючу поверхню у вигляді двовимірних полів густини загального випадіння [Бк/м²] для кожного радіонукліду на розрахунковій сітці відповідної моделі.

Атмосферне випадіння інтерполюється на камери моделі POSEIDON-R з прив'язкою до географічних координат. Оскільки камери моделі POSEIDON-R значно більші, ніж комірки розрахункової сітки моделі атмосферного переносу, то величина випадіння радіонукліду на поверхню кожної камери розраховується як лінійна сума зважених випадіннь усіх комірок сітки атмосферної моделі, що потрапляють на площу камери.

Отримані значення густини випадіння на кожну камеру моделі POSEIDON-R [Бк/м²] переводяться на потоки радіонукліду [Бк/рік] з урахуванням параметрів камер. З цією метою знаходиться загальне випадіння радіонукліду на поверхню камери [Бк], яке ділиться на час даного випадіння:

$$r = \frac{v \cdot S}{t_n - t_0}, \quad (1)$$

де r – потік випадіння на поверхню камери;

v – густина випадіння, отримана інтерполяцією з розрахункової сітки моделі атмосферного переносу;

$S = V/D$ – площа поверхні камери, що розраховується на основі даних моделі про об'єм V і середню глибину D камери;

t_0 і t_n – моменти часу початку і кінця розрахунку атмосферою моделлю відповідно.

Інтеграція моделі POSEIDON-R з моделлю переносу радіонуклідів по річковій мережі RIVTOX реалізована схожим чином. Результати розрахунків моделі RIVTOX у вигляді концентрації радіонукліду у воді [Бк/м³] і величини розходу води в гирлі річки [м³/с] в кожний розрахунковий момент часу зберігаються в системі RODOS і трансформуються в потік радіонуклідів [Бк/рік], що потрапляє у відповідну камеру моделі POSEIDON-R, в якій географічно знаходиться гирло річки. Приклад реалізації моделі POSEIDON-R в такій постановці в рамках системи RODOS приведений в наступному розділі.

4. Застосування моделі POSEIDON-R до умовного витоку радіоактивного ^{90}Sr з води Дунаю в Чорне море

Робота моделі POSEIDON-R, інтегрованої в систему RODOS, показана на прикладі застосування моделі до витоку радіоактивного ^{90}Sr з водами Дунаю в Чорне море в результаті умовного викиду радіонуклідів з АЕС Чорновода (Румунія).

Річка Дунай має досить розгалужену річкову сітку в районі АЕС Чорновода. В Чорне море (камера 44 в моделі POSEIDON-R) впадають три основні рукави: Кілійський, Сулинський і Святого Георгія, через які може потрапити забруднена радіонуклідами вода. Також безпосередньо від АЕС Чорновода проведений канал Дунай – Чорне море (витік каналу потрапляє в камеру 34 моделі POSEIDON-R).

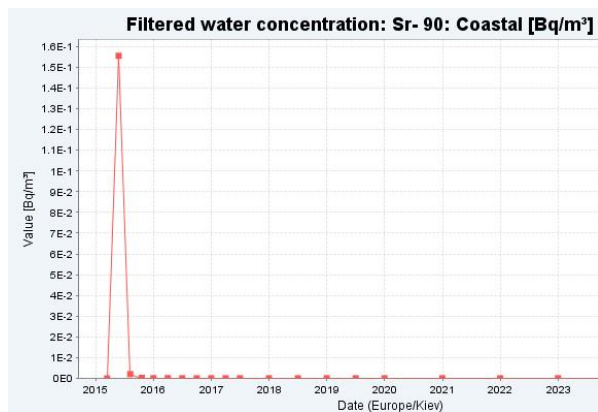
Згідно зі стресовим сценарієм, на АЕС Чорновода відбувся умовний атмосферний викид радіоактивного ^{90}Sr загальної активності $2.7 \cdot 10^{12}$ Бк. Модель атмосферного переносу LSMC в рамках системи RODOS розрахувала перенос і випадіння ^{90}Sr на поверхню землі. На основі цих даних був проведений прогноз на 2 місяці змиву радіонукліду з поверхні землі в річкову систему моделлю Retrace-R та його переносу в Чорне море моделлю RIVTOX. Величина опадів у вигляді дощу була прийнята на рівні 2 мм/день. Загальна кількість ^{90}Sr , що витекла в Чорне море по кожному рукаву, представлена в табл. 1. Ці дані були використані як джерело радіоактивності в моделі POSEIDON-R.

Таблиця 1. Загальна кількість ^{90}Sr , що витекла в Чорне море по кожному з рукавів річки Дунай протягом 2 місяців, розрахована моделлю RIVTOX

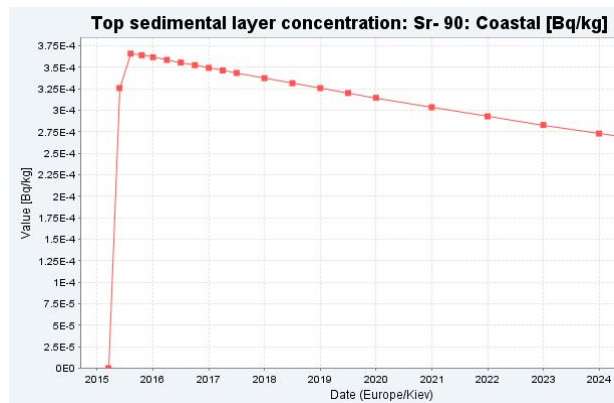
Рукав	Кілійський	Сулинський	Святого Георгія	Канал Дунай – Чорне море
^{90}Sr [Бк]	$0,43 \cdot 10^9$	$0,41 \cdot 10^9$	$0,36 \cdot 10^9$	$2,9 \cdot 10^9$
Усього витекло $4,1 \cdot 10^9$ Бк				

Для детального опису довготермінового переносу забруднення в воді, донних відкладеннях і морських організмах у найбільш забрудненій прибережній області в моделі POSEIDON-R було створено додаткову камеру навколо витоку каналу Дунай – Чорне море. Ця прибережна камера обмінюється водою з зовнішньою морською камерою 34. Її розміри становлять 20×10 км, а величина обміну водою з морською камерою – $50 \text{ км}^3/\text{рік}$.

Згідно з результатами моделювання, концентрація ^{90}Sr у воді у прибережній камері досягне максимуму приблизно через 2 місяці після витоку і повернеться до фонового значення ще через 4 місяці (рис. 3а). Концентрація в донних відкладеннях досягне максимуму через 6 місяців після витоку і буде дуже повільно знижуватися протягом багатьох років (рис. 3б). Це означає, що забруднення донних відкладень може залишатися протягом тривалого часу і впливати на донні організми. Проте значення отриманих концентрацій є надзвичайно низькими у порівнянні з існуючим забрудненням Чорного моря в результаті глобального атмосферного випадіння всередині минулого століття і аварії на Чорнобильській АЕС. Згідно з останніми вимірами [12], концентрація ^{90}Sr у Чорному морі становила близько $10 \text{ Бк}/\text{м}^3$ у воді і $0,3\text{--}0,6 \text{ Бк}/\text{кг}$ у донних відкладеннях.



a

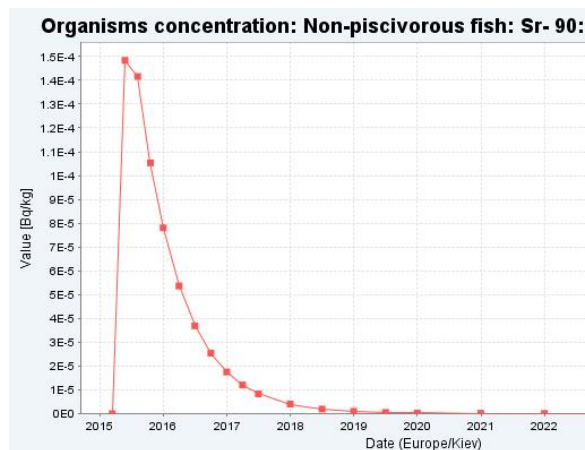


б

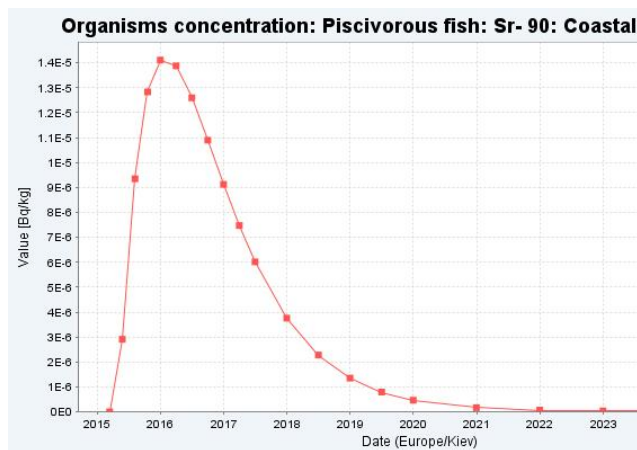
Рис. 3. Розраховані значення концентрації ^{90}Sr у воді (*a*) і донних відкладеннях (*б*) у прибережній камері

Розрахована концентрація ^{90}Sr у нехижій рибі (рис. 4*a*) досягне максимуму через 4 місяці після витоку і повернеться до фонових значень приблизно через 2–3 роки після цього. Концентрація в хижій поверхневій рибі (рис. 4*б*) досягне максимуму через рік після витоку і повернеться до фонових значень приблизно через 5 років після цього. Варто відмітити, що модель POSEIDON-R враховує, що ^{90}Sr накопичується в кістках риби. Оскільки час оновлення клітин кісток значно більший, ніж інших тканин риби, то ми отримуємо досить повільне затухання концентрації ^{90}Sr в рибі з часом. Для інших нуклідів (наприклад ^{137}Cs , який накопичується в м'язах) затухання буде швидшим. Аналогічно до води і донних відкладень розраховані значення концентрацій ^{90}Sr у рибі є значно нижчими, ніж існуючі концентрації за рахунок попереднього забруднення.

Тобто рівень забруднення прибережної області Чорного моря в результаті описаної умовної аварії на АЕС Чорновода буде в 100–1000 разів меншим від існуючих концентрацій радіоактивного ^{90}Sr в морському середовищі. Дані оцінки наведені для прибережної області безпосередньо навколо гирла Дунаю. У відкритому морі вплив такого роду аварії буде ще менший.



a



б

Рис. 4. Розраховані значення концентрації ^{90}Sr у нехижій (*a*) і хижій поверхневій (*б*) рибі у прибережній камері

На рис. 5 зображені поверхневі поля концентрації ^{90}Sr у воді в різні моменти часу, розраховані моделлю POSEIDON-R. Як і графіки на рис. 3 і 4, дані поля концентрацій побудовані під оболонкою системи RODOS. На рис. 5*a* видно початкову область забруднення

біля витоку р. Дунай і каналу Дунай – Чорне море, яке поступово розчиняється і переноситься на схід. Через два роки (рис. 5б) північно-західна частина Чорного моря починає очищуватися за рахунок притоку чистої води з річок Дніпра і Дунаю.

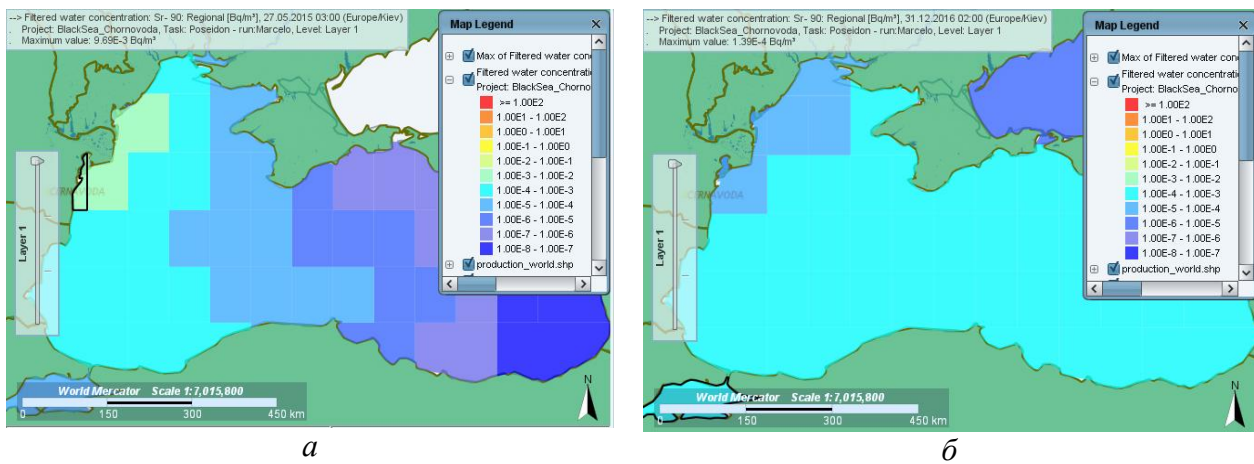


Рис. 5. Поверхневі поля концентрації ^{90}Sr у воді в перші місяці після забруднення (а) і через два роки (б)

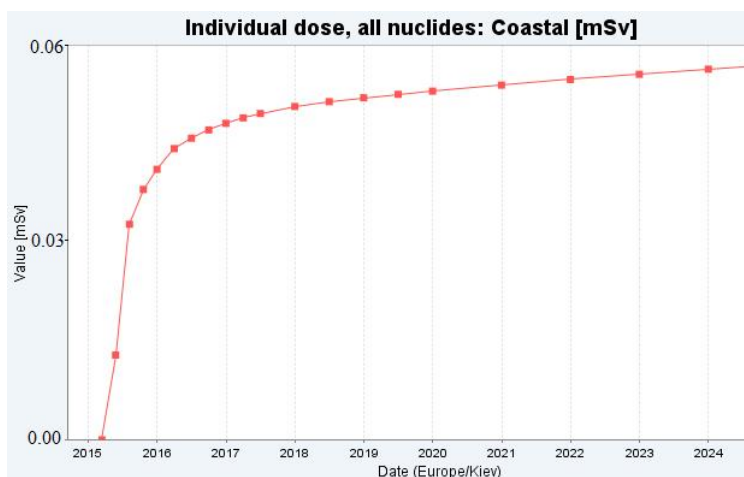


Рис. 6. Інтегральна індивідуальна доза внутрішнього опромінення (в мікроЗівертах) за рахунок споживання морепродуктів для прибережної камери

Ще одним результатом моделі POSEIDON-R є розрахунок дози внутрішнього опромінення за рахунок споживання морепродуктів для визначення необхідності застосування контрзаходів у рамках системи RODOS. Для нашого прикладу з умовним викидом радіоактивного ^{90}Sr з АЕС Чорновода отримані дози (рис. 6) є надзвичайно малими навіть для найбільш забрудненої прибережної камери. Відповідно до норм МАГАТЕ допустимою дозою для населення вважається 1000 мкЗв/рік.

Тобто, згідно з оцінками, отриманими в результаті розрахунків моделі POSEIDON-R в рамках системи RODOS, можна сказати, що даний тип умовної аварії на АЕС Чорновода не є небезпечним ні для морського середовища, ні для людини.

5. Висновки

Камерна модель POSEIDON-R була інтегрована в Європейську систему з ядерного аварійного реагування RODOS. Розроблено процедуру автоматичної передачі даних атмосферного випадіння на поверхню моря, розрахованого Модулем атмосферного переносу, та потоку радіонуклідів з річковою водою, розрахованого моделлю RIVTOX, у модель POSEIDON-R у рамках системи RODOS. Створено нову тривимірну систему камер Чорного моря.

Робота моделі POSEIDON-R, інтегрованої в систему RODOS, показана на прикладі застосування моделі до витоку радіоактивного ^{90}Sr з водами Дунаю в Чорне море в результаті умовного викиду радіонуклідів з АЕС Чорновода (Румунія). Реалізовано ланцюжок

моделей, що включає атмосферний перенос умовного викиду ^{90}Sr , його випадіння на землю, стік у річкову систему і перенос у Чорне море, а також довгостроковий прогноз забруднення морського середовища. Показано, що рівень забруднення прибережної області Чорного моря в результаті описаної умовної аварії на АЕС Чорновода буде в 100–1000 разів меншим від існуючих концентрацій радіоактивного ^{90}Sr в морському середовищі в результаті глобального атмосферного випадіння і аварії на Чорнобильській АЕС.

Дана робота виконувалася в рамках Проекту PREPARE Європейської комісії з атомної енергії № 323287 та за підтримки проекту Фонду фундаментальних досліджень України Ф68/12779 «Перенос радіоактивності між забрудненими донними відкладеннями і морським середовищем після аварії на АЕС Фукусіма і Чорнобильській АЕС».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. JRODOS: Platform for improved long term countermeasures modelling and management / W. Raskob, D. Trybushnyi, I. Ievdin [et al.] // Radioprotection. – 2011. – Vol. 46, N 6. – P. S731 – S736.
2. Беженар Р. Моделирование накопичення радіоактивного ^{90}Sr у морських організмах / Р. Беженар // Математичні машини і системи. – 2017. – № 1. – С. 61 – 70.
3. Regional long-term model of radioactivity dispersion and fate in the Northwestern Pacific and adjacent seas: application to the Fukushima Dai-ichi accident / V. Maderich, R. Bezhenar, R. Heling [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – Vol. 131. – P. 4 – 18.
4. Dispersion and fate of ^{90}Sr in the Northwestern Pacific and adjacent seas: global fallout and the Fukushima Dai-ichi accident / V. Maderich, K.T. Jung, R. Bezhenar [et al.] // Science of the Total Environment. – 2014. – Vol. 494 – 495. – P. 261 – 271.
5. Transfer of radiocaesium from contaminated bottom sediments to marine organisms through benthic food chain in post-Fukushima and post-Chernobyl periods / R. Bezhenar, K.T. Jung, V. Maderich [et al.] // Biogeosciences. – 2016. – Vol. 13. – P. 3021 – 3034.
6. Lepicard S. POSEIDON-R/RODOS models for radiological assessment of marine environment after accidental releases: application to coastal areas of the Baltic, Black and North Seas / S. Lepicard, R. Heling, V. Maderich // Journal of Environmental Radioactivity. – 2004. – Vol. 72. – P. 153 – 161.
7. COPERNICUS: Marine Environment Monitoring Service [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://marine.copernicus.eu/>.
8. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation. Exposures of the public from man-made sources of radiation // Sources and Effects of Ionizing Radiation. – United Nations, New York, 2000.
9. ^{90}Sr and ^{137}Cs in the Black Sea after the Chernobyl NPP accident: inventories, balance and tracer applications / V.N. Egorov, P.P. Povinec, G.G. Polikarpov [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 1999. – Vol. 43. – P. 137 – 155.
10. Distribution of artificial radionuclides in the Black Sea and Mediterranean Sea in 1989-1990 / O.V. Stepanets, V.M. Komarevsky, A.P. Borisov [et al.] // Physical Oceanography. – 1993. – Vol. 4, N 5. – P. 417 – 423.
11. ^{90}Sr and ^{137}Cs in Surface Waters of the Dnieper River, the Black Sea and the Aegean Sea in 1987 and 1988 / G.G. Polikarpov, L.G. Kulebakina, V.I. Timoshchuk [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 1991. – N 13. – P. 25 – 38.
12. Secondary radioactive contamination of the Black Sea after Chernobyl accident: recent levels, pathways and trends / S.B. Gulin, N.Yu. Mirzoyeva, V.N. Egorov [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2013. – Vol. 124. – P. 50 – 56.
13. Pasler-Sauer J. Description of the atmospheric dispersion model ATSTEP / J. Pasler-Sauer. – RODOS Report: RODOS(RA2)-TN(04)-03, 2004. – 30 p. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://resy5.iket.kit.edu/RODOS/>.
14. Nielsen T.S. Description of the Atmospheric Dispersion Module RIMPUFF / Nielsen T.S., Deme S., Mikkelsen T. – RODOS report: RODOS(WG2)-TN(98)-02, 1998. – 58 p. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://resy5.iket.kit.edu/RODOS/>.

15. RODOS meteorological pre-processor and atmospheric dispersion model DIPCOT: a model suite for radionuclides dispersion in complex terrain / S. Andronopoulos, E. Davakis, J. Bartzis [et al.] // Radioprotection. – 2010. – Vol. 45, N 5. – P. 77 – 84.
16. Janicke L. Particle simulation of inhomogeneous turbulent diffusion / L. Janicke // Air Pollution Modeling and Its Application II. – 1983. – P. 527 – 535.
17. Robertson L. MATCH development during the EURANOS project / L. Robertson // Radioprotection. – 2010. – Vol. 45. – P. 85 – 88.

Стаття надійшла до редакції 06.07.2017