ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Беженара Романа Васильовича

«Інформаційні технології моделювання забруднення водних екосистем для комп'ютерної підтримки рішень з радіаційної безпеки»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології

1. Актуальність теми дослідження та її зв'язок з науковими роботами.

Аварія 1986 року на Чорнобильській АЕС стала прикладом великої комунальної радіаційної аварії, впливу якої зазнало населення далеко за межами зони відповідальності АЕС. Однією з головних причин недостатнього рівня радіологічного захисту населення радіоактивно забруднених територій в гостру фазу аварії була відсутність в СРСР та європейських країнах інформаційних систем, які б в оперативному режимі дали перші оцінки та прогноз розвитку радіаційної обстановки. Тому для підвищення ефективності аварійної готовності та аварійного реагування на радіаційні аварії на об'єктах атомної енергетики з кінця 80-х років розпочався розвиток інформаційних систем підтримки прийняття рішень (СППР) щодо захисту населення від наслідків радіаційних аварій, які використовують комплекс моделей міграції радіонуклідів в атмосфері, ґрунті, харчових ланцюгах, а також моделей розрахунку доз зовнішнього та внутрішнього опромінення людини. В частині розповсюдження радіонуклідів в водних об'єктах основна увага була зосереджена на моделюванні забруднення та міграції радіонуклідів в поверхневих водах річкових систем, що пояснювалось специфікою розташування більшості європейських АЕС в глибині континенту. Наступна велика аварія на АЕС Фукусіма-1 в 2011 р., розташованій на узбережжі океану, виявила суттєві прогалини в структурі СППР, створених до того часу, що було пов'язано з відсутністю надійних модельних інструментів для оцінок радіоактивного забруднення морської та океанічної води, донних відкладень та водної біоти, а також відповідних доз опромінення населення, в першу чергу за рахунок споживання морепродуктів. Вирішення цієї задачі фактично завершує формування повної структури СППР, призначених для забезпечення захисту населення при радіаційних аваріях, і має врахувати практично всі основні шляхи формування доз опромінення населення, що потрапило в зону радіоактивного забруднення. Дисертаційна робота Р.В. Беженара спрямована на розв'язання цієї проблеми, що і визначає актуальність обраної теми дисертації.

ІПММС АН України
Вх. № 7
«31» 08 2020р.

Основні результати дисертаційної роботи було отримано в рамках виконання бюджетних тем та фундаментальних досліджень Інституту проблем математичних машин і систем НАН України, а також ряду міжнародних проектів.

2. Зміст дисертації.

Дисертація Р.В. Беженара складається з вступу, семи розділів, висновків та семи додатків.

У ***вступі*** сформульовані мету та завдання дослідження, їх актуальність, зв'язок з науковими програмами, новизна та практичне значення, вказано особистий внесок здобувача.

В ***першому розділі*** проведено огляд проблеми моделювання переносу радіонуклідів у морському середовищі та їх використання в інформаційних системах, що створюються з метою інформаційної підтримки прийняття рішень щодо захисту населення у випадку радіоактивного забруднення навколишнього середовища. Сформульовано загальні принципи моделювання переносу забруднення в морському середовищі, включаючи процеси адвективного та конвективного перенесення, дифузії, взаємодії в системі "вода – тверді частинки". Наведено огляд моделей накопичення радіонуклідів у морських організмах.

Другий розділ присвячено викладенню кінетично-алометричної моделі неоднорідного засвоєння забруднення в рибі, яку було розроблено автором. Проведено обгрунтування вибору параметризації основних процесів, що описує модель, та наведено результати її валідації на даних лабораторних експериментів засвоєння рибою радіоактивних ізотопів кобальту, марганця та цезію.

В ***третьому розділі*** наводиться опис камерної моделі POSEIDON-R, яка включає підмоделі розрахунку переносу радіонуклідів в морському середовищі, обміну придонного шару води з донними відкладеннями, переносу радіонуклідів по пелагічному ланцюжку живлення морських організмів та блок оцінки доз внутрішнього опромінення населення за рахунок споживання морепродуктів. Показано, що, з урахуванням досвіду вивчення наслідків аварії на АЕС Фукусіма-1, виникла необхідність модифікації та розширення моделі POSEIDON-R за рахунок включення в неї донного ланцюжка живлення морських організмів, який обумовлює накопичення радіонуклідів в них в довгостроковій перспективі, і, відповідно, формує значну частину дози внутрішнього опромінення населення на пізній фазі аварії. Наведено опис чисельного методу розв'язання системи диференційних рівнянь моделі за допомогою матрично-експоненційного методу.

Наступні три розділи роботи присвячені викладенню результатів моделювання радіоактивного забруднення морських та океанічних басейнів, виконаних за допомогою моделі POSEIDON-R (Чорного, Середземного, Балтійського, Північного та Ірландського

морів та частини Тихого океану в районі розташування АЕС Фукусіма-1). Важливим етапом при виконанні кожної з цих задач було створення відповідних камерних моделей досліджуваних об'єктів. При цьому в кожному випадку автором було виявлено, проаналізовано та враховано в моделі вплив специфічних умов регіону на формування полів радіоактивного забруднення морської води, донних відкладень та морепродуктів. Зокрема, при реконструкції радіоактивного забруднення Чорного моря нуклідами ^{137}Cs та ^{90}Sr в період з 1945 по 2020 рр. (***четвертий розділ)*** було створено спільну камерну модель Чорного та Середземного морів з урахуванням водообміну між ними та притоків забруднення через стік радіоактивності з водою основних річок регіону. Показано, що результати розрахунків поля концентрації ^{137}Cs та ^{90}Sr в воді, виконаних за допомогою моделі POSEIDON-R, достатньо добре узгоджуються з даними вимірювань як у період до 1986 р. (коли основним джерелом забруднення були глобальні випадання продуктів випробувань ядерної зброї), так і після Чорнобильської аварії (сполучення прямих випадань радіонуклідів з атмосфери в гострий період аварії та їх винесення в Чорне море з річковим стоком згодом). Крім того, отримано добре узгодження результатів моделювання з вимірами вмісту радіонуклідів в донних відкладеннях та рибі. Показано, що врахування впливу зниженої солоності води в Чорному морі істотно не впливає на модельні оцінки забруднення риби, за винятком лиманів та гирл річок. В результаті аналізу отриманих даних зроблено висновок, що забруднення риби для умов Чорного моря можна оцінити за допомогою концентраційного фактору, та визначено його значення для ^{137}Cs та ^{90}Sr для риб різного типу. Отримані результати дали змогу оцінити динаміку загального вмісту радіонуклідів в воді та донних відкладеннях Чорного моря та зробити прогноз їх змін на найближчий період.

В ***п'ятому розділі*** наведено результати моделювання переносу радіоактивного забруднення за допомогою камерної моделі POSEIDON-R, адаптованої до європейських морів. В роботі успішно розв'язана проблема опису складних течій в Середземному морі в рамках камерної моделі, включаючи параметризацію водообміну з Чорним морем та Атлантичним океаном на основі двошарової схеми течій. В результаті моделювання оцінено відносні внески різних джерел радіоактивного забруднення в величину концентрації ^{137}Cs та ^{90}Sr в воді різних частин Середземного моря та виявлено вплив локальних географічних факторів на особливості формування вертикальних профілів радіоактивного забруднення морської води. Важливим результатом роботи є визначення т.з. «еталонних» камер, тобто ділянок моря з типовими для данного регіону властивостями поля радіоактивного забруднення. Проведено балансові оцінки внесків основних джерел та шляхів витоку ^{137}Cs у загальний вміст радіонукліда для Середземного і Чорного морів. Результати розрахунків радіоактивного забруднення Балтійського моря, отримані за допомогою моделі POSEIDON-

R, було валідовано з використанням як даних вимірювань, так і результатів 3-вимірної моделі THREETOX та отримано добре узгодження результатів моделювання та вимірювань. Розрахунки, проведені з використанням моделі POSEIDON-R, адаптованої для умов Північного та Ірландського морів, дозволили виявити важливий внесок процесу резуспензії радіоактивних донних відкладень, що сформувалися внаслідок тривалих скидів зі збагачувального заводу Селлафілд.

У ***шостому розділі*** наведено результати моделювання забруднення ^{137}Cs і ^{90}Sr у морському середовищі північно-західної частини Тихого океану, обумовленому забрудненням як від випробувань атомної зброї, так і від аварії на АЕС Фукусіма-1. За допомогою розробленого модельного апарату розраховано індивідуальні та колективні дози опромінення, отримані населенням Японії від споживання забруднених морепродуктів. Продемонстровано ефективність використання розробленої кінетично-алометричної моделі розрахунку накопичення забруднення в різних тканинах риби для коректної оцінки доз внутрішнього опромінення населення Японії.

В ***сьомому розділі*** наведено результати інтегрування моделі POSEIDON-R з модулями атмосферного перенесення, моделювання річкового стоку та розрахунку доз опромінення населення від прісноводних шляхів міграції радіонуклідів в рамках СППР RODOS. З їх допомогою проведено оцінку наслідків реального радіаційного інциденту 1998 р. в Іспанії та гіпотетичної радіаційної аварії на АЕС в Румунії. Крім того, продемонстровано переваги розробленої в роботі моделі неоднорідного накопичення забруднення в морській біоті на прикладі оцінки радіоактивного забруднення риби внаслідок тривалих радіоактивних витоків з АЕС Форсмарк (Швеція) в Балтійське море при нормальній роботі станції.

3. Наукова новизна роботи полягає в тому, що в результаті створено модельний інструмент, який дозволяє робити оцінки та прогнозування радіоактивного забруднення води, донних відкладень та водної біоти в морських середовищах України та Європи, оцінювати та прогнозувати фактичні та потенційні дози опромінення населення за рахунок споживання морепродуктів та перебування в прибережних районах радіоактивно забруднених морів. Вказаний інструмент включає ряд моделей, розроблених чи суттєво удосконалених автором, включаючи кінетично-алометричну модель неоднорідного засвоєння забруднення рибою, модель донного ланцюжка живлення, параметризаційну залежність засвоєння ізотопів цезію і стронцію від концентрації конкуруючих іонів калію і кальцію.

З використанням розробленого модельного апарату встановлено закономірності багаторічної динаміки формування полів радіоактивного забруднення морського середовища Чорного моря, основних морів Європейського континенту та частини Тихого океану поблизу

узбережжя Японії. За результатами наукового аналізу виявлено основні джерела радіоактивного забруднення води, донних відкладень та аквабіоти та їх відносний внесок в радіоактивне забруднення різних частин морських об'єктів, в тому числі глобальні випадіння, забруднення внаслідок радіаційних аварій, регулярні витоки від діючих підприємств ядерно-енергетичного циклу.

4. Ступінь обґрунтованості отриманих в дисертації результатів. Наукові результати, наведені в дисертації, а також висновки та рекомендації, є достатньо обґрунтованими та достовірними. Вони базуються, по-перше, на використанні сучасних підходів до моделювання процесів міграції радіонуклідів в водному середовищі та їх засвоєння морськими організмами, які дозволяють враховувати з достатньою деталізацією основні механізми, що їх визначають,. По-друге, ретельним вибором параметрів моделей за літературними даними натурних вимірювань та лабораторних експериментів. По-третє, проведеною в роботі валідацією моделей на даних вимірювань радіоактивного забруднення води та морських організмів, отриманих за весь період спостережень з 40-х років до цього часу, та отриманою достатньо високою узгодженістю результатів моделювання з даними натурних вимірювань. Важливо підкреслити, що така валідація проводилася окремо для кожного морського басейну, який розглядався, з метою врахування конкретних особливостей формування полів радіоактивного забруднення води в ньому, що засвідчило універсальність запропонованих методів моделювання радіоактивного забруднення морських басейнів і морських організмів та достовірність отриманих результатів.

5. Практична цінність роботи полягає в тому, что в результаті виконання даної роботи було створено обчислювальний модуль для розрахунку наслідків радіоактивного забруднення в морях Європи, який увійшов в склад Європейської системи ядерного аварійного реагування RODOS. Ця система використовується в 16 країнах як основний інструмент для оперативної оцінки та прогнозування наслідків впливу радіоактивного забруднення навколишнього середовища на населення у випадку аварій на АЕС та інших радіаційних інцидентів. Вказана система експлуатується в організаціях та відомствах України, відповідальних за радіаційну безпеку країни, в якості одного з ключових елементів аварійної готовності та аварійного реагування на радіаційні аварії в державі. Крім того, розробки автора знайшли своє застосування в інформаційній системі PREDO, яка дає можливість контролювати дози опромінення населення внаслідок регулярних витоків радіонуклідів з АЕС Швеції у морське середовище. Свідченням високої оцінки практичних результатів даної роботи не тільки в Україні, а й в у світі, є наявність актів їх впровадження в Україні, Кореї, Швеції та Німеччині (Додаток А).

6. Зауваження та побажання. Разом з тим, опонент вважає за необхідне зупинитися на деяких моментах, на які бажано отримати роз'яснення від здобувача.

1. Дана робота фактично охоплює всю проблему оцінки та прогнозування наслідків радіоактивного забруднення водних систем з використанням сучасних систем підтримки прийняття рішень щодо захисту населення від наслідків викидів та скидів з радіаційно-небезпечних об'єктів. Тому, на думку опонента, цінність даної роботи збільшилась, якщо б першим пунктом її висновків було сформульовано загальні методичні принципи побудови водного блоку СППР, а саме: 1) структура блоку (моделі забруднення річкових та озерних систем, морські моделі, моделі забруднення водної біоти, відповідні дозиметричні моделі), 2) рекомендації щодо вибору конкретного типу моделей розрахунку забруднення морського середовища (камерні, одно-, дво-, тривимірні), що мають використовуватися в СППР в залежності від характеру забруднення (при нормальній діяльності або аварійний викид), фази аварії (гостра, проміжна, пізня), типу та розташування джерела забруднення, просторових масштабів задачі тощо; 3) загальні вимоги до побудови таких моделей з урахуванням можливої специфіки конкретного географічного регіону. Аналогічним чином мають бути сформульовані загальні вимоги до моделей розрахунку забруднення морепродуктів та відповідних моделей оцінки доз опромінення населення.

2. У Висновках серед переліку нових наукових та практичних результатів сказано, що «розроблені процедури автоматичної передачі даних для інтеграції камерної моделі POSEIDON-R в Європейську систему ядерного аварійного реагування RODOS». Проте з опису результатів інтеграції моделі POSEIDON-R в RODOS (глава 7) не ясно, в чому саме полягає наукова новизна результатів вирішення цієї задачі.

3. В розділі 2 наведено результати верифікації розробленої автором кінетично-алометричної моделі на даних лабораторних експериментів забруднення риби ізотопами ^{57}Co, ^{54}Mn і ^{134}Cs, які засвідчили її добре узгодження з експериментальними даними. При цьому переваги нової моделі виглядали б ще наглядніше, якщо б було зроблено порівняння не тільки з даними вимірювань, але й з результатами застосування попередніх, більш простих моделей для цих експериментів.

4. Запропонована автором параметризація ресуспензії радіонуклідів з донних відкладень в придонний шар води в моделі POSEIDON-R визначає її інтенсивність як лінійну функцію придонної швидкості течії. Між тим інтенсивність аналогічного процесу підйому пилових часток з поверхні землі в моделях вітрової ресуспензії, як правило, задається пропорційною приземній швидкості вітру в кубі. Тому було б бажано в роботі вказати, на основі яких даних було обрано саме таку параметризацію.

5 В розділі 3.6.1 «Дози внутрішнього опромінення» розрахунок доз опромінення за рахунок інгаляційного шляху надходження радіонуклідів у відповідності з загальними підходами та для повноти оцінок необхідно проводити для різних вікових категорій (не тільки для дорослих).

6. В тексті дисертації зустрічаються дрібні неточності в формулюваннях та некоректні визначення, які, втім, не впливають на результати роботи, зокрема:

стор. 14 – «аварійних викидів радіонуклідів у р. Стир» (загальноприйняте вживання термінів - викиди в атмосферу, скиди – в водні системи);

стор. 18 – «ядерному заводі "Маяк"» (назви підприємства, які використовуються - виробниче об'єднання, або завод по збагаченню ядерного палива);

стор. 18 – «ядерної промисловості» (краще – атомної промисловості);

стор. 305 – «атомних об'єктів» (краще – об'єктів атомної енергетики / атомної промисловості);

стор. 24 – «допустимий рівень опромінення для населення від антропогенних радіонуклідів становить 1 мЗв/рік. При перевищенні цієї величини рекомендують проводити евакуацію населення з регіону, де спостерігається таке перевищення» (насправді при перевищенні цього рівня рекомендується не евакуація, а менш радикальні контрзаходи щодо зменшення дози опромінення населення, яке проживає на цій території);

стор. 26 – «аварія на Чорнобильській АЕС 1986 року спричинила найбільший миттєвий викид радіоактивності в навколишнє середовище» (викид протягом як мінімум 10 діб не можна охарактеризувати як миттєвий);

стор. 32 – «оцінки дозових впливів на людину» (краще – оцінки впливу опромінення на людину; доза – це кількісна характеристика такого впливу);

стор. 49 – «потрапляння забруднення з атмосфери у вигляді "сухого" і "мокрого" випадіння» - некоректне використання термінів з проблеми атмосферного перенесення при описі правильних формул для граничних умов камерної моделі. Для радіонуклідів, що розглядаються в роботі, як «сухі», так і «мокрі» («вологі») випадання на водну поверхню призводять до надходження в водні об'єкти твердих аерозольних часток, тобто описуються граничною умовою (1.12);

стор. 143 – «густина випадіння» (правильно - щільність випадань);

стор. 259 – при однаковій активності ізотопів ^{134}Cs і ^{137}Cs дози опромінення від них будуть різнитися внаслідок різних значень дозиметричних коефіцієнтів.

Зроблені зауваження і побажання не впливають на загальну високу оцінку наукового рівня дисертації та не піддають сумніву основні наукові результати, отримані автором, та їх

значення для вирішення проблеми підвищення радіаційного захисту населення України та інших країн.

7. Повнота викладу основних наукових результатів дисертації в опублікованих працях.

Основні результати дисертації достатньо повно викладено та опубліковано в 45-ти публікаціях в наукових журналах та збірниках праць, було апробовано на багатьох вітчизняних і міжнародних фахових наукових конференціях та семінарах. Наукові публікації Р.В. Беженара повністю відповідають змісту дисертації.

8. Відповідність дисертації Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань.

Все вищенаведене дає підстави твердити, що дисертаційна робота «Інформаційні технології моделювання забруднення водних екосистем для комп'ютерної підтримки рішень з радіаційної безпеки» повністю відповідає вимогам документу «Порядок присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» щодо докторських дисертацій, а її автор Р.В. Беженар заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології.

Офіційний опонент:
доктор технічних наук,
завідувач відділу радіаційної екології
Інституту проблем безпеки
атомних електростанцій НАН України М.М. Талерко

Підпис М.М. Талерка засвідчую

Інститут проблем безпеки атомних електростанцій * Національна академія наук України * м. Чорнобиль * Київська область * Україна *
ІПБ АЕС
Ідентифікаційний код
13723792
1