

Л. І. Григор'єва, Ю. А. Томілін, К. В. Григор'єв

*Чорноморський державний університет імені Петра Могили, Миколаїв***ЕКСПРЕС-ПРОГНОЗ ДОЗОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА НАСЕЛЕННЯ  
ВІД ГАЗОАЕРОЗОЛЬНИХ ВИКИДІВ АЕС**

Запропоновано експрес-метод перспективної оцінки дозового навантаження на населення з територій, які знають одночасного впливу від радіонуклідних поллютантів природного та штучного походження. На підставі результатів радіоекологічних досліджень на територіях, що піддаються впливу газоаерозольних викидів Южно-Української та Запорізької АЕС, розраховано величини середньорічних та очікуваних за життя людини нормалізованих величин дозового навантаження від газоаерозольних викидів АЕС, здатних полегшити роботу системи дозиметричного моніторингу територій поблизу АЕС.

*Ключові слова:* ефективна доза, дозова ціна, газоаерозольні викиди АЕС, радіаційно-екологічний моніторинг.

**Вступ**

Важливим засобом забезпечення радіаційної безпеки при використанні ядерної енергії є радіаційно-екологічний моніторинг, під яким розуміється система регулярних спостережень за показниками радіонуклідного забруднення оточуючого середовища та параметрами стану біоти, з метою своєчасного виявлення й прогнозування небажаних для екосистем та людини наслідків. Одночасно сьогодні відомі недосконалості сучасної системи організації радіаційно-екологічного моніторингу територій, особливо поблизу ядерних об'єктів, які полягають у неможливості швидкої орієнтації у прогнозованих рівнях опромінення населення через трудомісткість досліджень міграції радіонуклідних поллютантів у довкіллі, невиправдану втрату часу для проведення численних спостережень за усіма радіонуклідами із суміші викиду.

У роботі представлено результати виконаних досліджень за двостороннім україно-білоруським науково-дослідним проектом Ukrainian State Fund for Fundamental Researches – Belarus Republican Fund for Fundamental Researches №54.4/034-2013 (0113U004459) та кафедральною темою ЧДУ імені Петра Могили (0113U005721). На підставі результатів наших багаторічних (1980 - 2009 рр.) радіоекологічних та дозиметричних досліджень у районі Южно-Української АЕС (ЮУ АЕС) та Запорізької АЕС (ЗАЕС) здійснено пошук апарату оперативного прогнозування дозового навантаження на людину від викидів АЕС в умовах звичайної її роботи.

**Методи дослідження**

Матеріалами виступали результати наших багаторічних (1980 - 2009 рр.) радіоекологічних та дозиметричних досліджень у районі ЮУ АЕС та

ЗАЕС [8], частково висвітлених у [9 - 11], результати НДР [5] та звітні матеріали [14]. При цьому доза зовнішнього опромінення людини визначалася за результатами вимірювань:

1) потужності експозиційної дози на відкритій місцевості в місцях розташування стаціонарних постів спостереження в 30-кілометровій зоні ЮУ АЕС за допомогою приладів СРП-88Н і ДБГ-06 [14];

2) потужності експозиційної дози на відкритій місцевості в місцях розташування датчиків системи АСРК [8];

3) інтегральної поглиненої дози в повітрі за допомогою термолюмінісцентних дозиметрів ТЛД-500К у стаціонарних пунктах спостереження навколо ЮУ АЕС [14];

4) радіонуклідного складу атмосферних випадів седиментаційним методом шляхом радіометрії зібраного пилу на спектрометричній установці SBS-50М з напівпровідниковим детектором ДГДК-175В-3 [14];

5) радіонуклідного складу аерозолів атмосферного повітря аспіраційним методом у пунктах спостереження навколо ЮУ АЕС із щотижневим відбором проб при постійному режимі роботи фільтроелектроустановки та подальшим щоквартальним озоненням проб, об'єднаних по пунктах, які знаходяться на однакових радіусах навколо АЕС: перший радіус – 0...+3 км, другий – 3...8 км, третій – 8...16 км, четвертий – 16...24 км та контрольний пункт на відстані 33 км від АЕС.

Доза внутрішнього опромінення людини визначалася за результатами:

1) багаторічних (1980 - 2000 рр.) радіоекологічних досліджень у районі ЮУ АЕС та ЗАЕС, виконаних у Миколаївській науково-дослідній лабораторії «Ларані» [8];

2) дозиметричних досліджень, проведених лабораторією зовнішньої дозиметрії ЮУ АЕС за 1999 - 2009 рр. [14].

Моделювання розсіювання викидів з АЕС суміші радіонуклідів виконано на підставі гауссової моделі відповідно до рекомендацій МАГАТЕ [1, 2]. При визначенні дифузійних властивостей повітряного середовища в районі ЮУ АЕС використано дані багаторічних спостережень метеостанції м. Вознесенськ та метеостанції ЮУ АЕС. Оцінку випадіння радіонуклідів виконано, враховуючи розу вітрів для відстані 2500 м, де розташований найближчий до АЕС населений пункт. Ефективну дозу за рахунок інкорпорованих радіонуклідів визначено згідно з існуючою у сфері радіаційної безпеки методикою обчислення ефективної еквівалентної дози через сумарне річне надходження радіонуклідів в організм людини з використанням рекомендованих МКРЗ дозових коефіцієнтів [3, 4]. Ефективна доза розраховувалася для референтного віку «дорослий».

При розробці методу оперативного прогнозування дозового навантаження на населення використано метод камерних моделей, метод базової радіаційної характеристики та реперного радіонукліда [6, 12, 13, 15]. В основі взято принцип нормалізації, тобто представлення результатів моделювання на одиницю радіаційного забруднення камери, що стоїть на початку дозоформуючого ланцюга [6, 15]. Нормалізація виконувалася за базовою радіаційною характеристикою (BRD), встановлення якої здійснювали виходячи з таких принципів: цей показник повинен не тільки характеризувати радіаційне забруднення об'єкта довкілля, що стоїть на початку дозоформуючого ланцюга, а також враховувати інші чинники, які модифікують вплив радіаційного забруднення цього об'єкта на людину.

При перевірці надійності прогнозування за запропонованим способом застосовано метод статистичного експерименту (метод Монте-Карло). При розробці прогнозних моделей формування інтегрального радіаційного навантаження на людину застосовано статистичну методологію, на підставі якої на заміну детермінованих величин змодельованої дози отримують їхні стохастичні аналоги. При обробці результатів досліджень використовували методи дисперсійного аналізу даних і методи багатовимірної статистично аналізу за допомогою програмного забезпечення STATISTICA 10.0.

### Результати та їхнє обговорення

За результатами вимірювань потужності експозиційної дози на відкритій місцевості навколо ЮУ АЕС протягом 1980 - 2009 рр. радіаційний фон знаходився на рівні  $15 - 22 \text{ мкР} \cdot \text{год}^{-1}$ , що відповідає природним для регіону значенням.

Аналогічні дослідження на території навколо ЗАЕС показали значення  $13 - 15 \text{ мкР} \cdot \text{год}^{-1}$ . Виходячи з цього, середня доза зовнішнього (external) опромінення  $E_{extr}^{ext}$  для населення з територій поблизу ЮУ АЕС становила  $0,80 \pm \pm 0,05 \text{ мЗв} \cdot \text{рік}^{-1}$ , а для населення поблизу ЗАЕС –  $0,97 \pm 0,05 \text{ мЗв} \cdot \text{рік}^{-1}$ . За даними лабораторії зовнішньої дозиметрії ЮУ АЕС [10] доза  $E_{extr}^{ext}$ , у середньому, дорівнювала  $0,75...0,95 \text{ мЗв} \cdot \text{рік}^{-1}$ .

Як відомо, крім фотонного опромінення, розсіяні у повітрі радіонукліди з АЕС (станційні радіонукліди) можуть обумовлювати також внутрішнє опромінення, потрапляючи при цьому до організму людини через дихальні шляхи й шлунково-кишковий тракт. Ефективна доза внутрішнього (internal) опромінення людини при інгаляційному (inhal) надходженні радіонуклідів, які потрапляють у зовнішнє середовище з газоаерозольними викидами (extrass) ЮУ АЕС –  $E_{st-extr}^{int(inhal)}$ , обчислена за результатами гамма-спектрометричних та радіохімічних аналізів проб атмосферного повітря за період 1999 - 2009 рр. у стаціонарних постах 30-кілометрової зони навколо ЮУ АЕС. Інтервал середньорічних значень  $E_{st-extr}^{int(inhal)}$  становить  $(10...100) \cdot 10^{-12} \text{ Зв} \cdot \text{рік}^{-1}$ .

Величину дози  $E_{st-extr}^{int(inhal)}$  було уточнено розрахунковим методом виходячи з відомостей про викиди радіонуклідів ( $^{137,134}\text{Cs}$ ,  $^{58,60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{110m}\text{Ag}$ ,  $^{131}\text{I}$ ) ЮУ АЕС у 1999 - 2009 рр.

[14]. Ефективна доза  $E_{st-extr}^{int(inhal)}$  визначена для відстані 2,5 км від ЮУ АЕС (це відстань між ЮУ АЕС та найближчим до неї населеним пунктом - м. Южноукраїнськ) за 16 румбами напрямку вітру. Зазначену відстань узято з точки зору верхніх оцінок ефективної дози  $E_{st-extr}^{int(inhal)}$ .

У результаті сумарна середньорічна ефективна доза  $E_{st-extr}^{int(inhal)}$  становить  $(10...200) \cdot 10^{-12} \text{ Зв} \cdot \text{рік}^{-1}$ , у тому числі за окремими радіонуклідами,  $\text{Зв} \cdot \text{рік}^{-1}$ : за  $^{137}\text{Cs}$   $(2...8) \cdot 10^{-12}$ , за  $^{134}\text{Cs}$   $(2...5) \cdot 10^{-12}$ , за  $^{60}\text{Co}$   $(5...13) \cdot 10^{-12}$ , за  $^{58}\text{Co}$   $(0,1...0,8) \cdot 10^{-12}$ , за  $^{54}\text{Mn}$   $(0,04...0,4) \cdot 10^{-12}$ , за  $^{51}\text{Cr}$   $(0,04...0,8) \cdot 10^{-12}$ , за  $^{59}\text{Fe}$   $(0,2...1) \cdot 10^{-12}$ , за  $^{95}\text{Nb}$   $(0,05...0,2) \cdot 10^{-12}$ ,  $^{110m}\text{Ag}$   $(0,5...2,5) \cdot 10^{-12}$ ,  $^{131}\text{I}$   $(2...200) \cdot 10^{-12}$ ,  $^3\text{H}$   $(1...3) \cdot 10^{-12}$ .

Структуру ефективної дози  $E_{st-extr}^{int(inhal)}$  за радіонуклідами наведено на рис. 1, а. Відзначимо, що отримані розрахункові величини добре узгоджуються з результатами обчислення інгаляційної дози за даними натурних досліджень, наведеними вище.

Ефективна  $E_{st-extr}^{int(ing)}$  доза внутрішнього опромінення людини за ланцюгом міграції «газоаерозольні викиди радіонуклідів - атмосферне

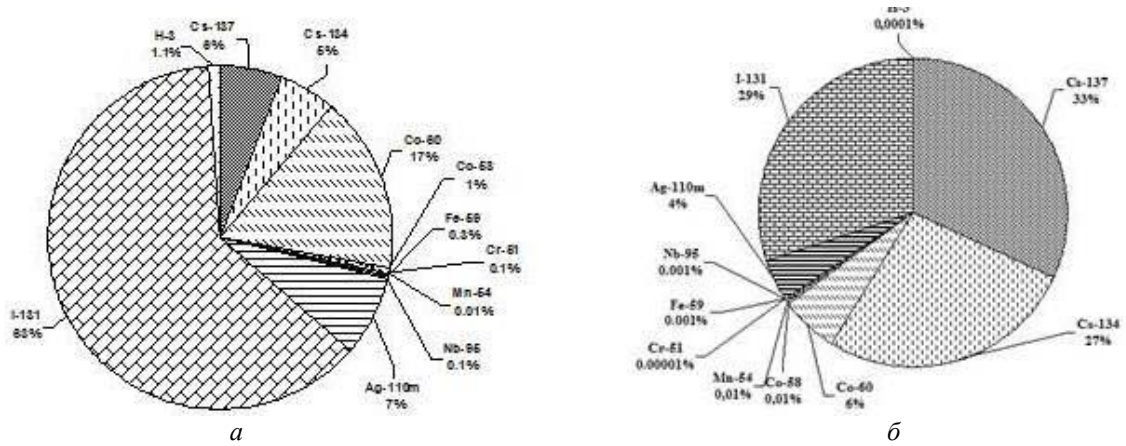


Рис. 1. Структура ефективної дози за радіонуклідами (для територій радіусом 2,5 км навколо ЮУ АЕС):

$$a - E_{st-extr}^{int(inhal)}; \quad б - E_{st-extr}^{int(ing)}$$

повітря - ґрунт (листя рослин) - сільськогосподарські рослини - людина» визначена за середньорічними даними викидів цих радіонуклідів ЮУ АЕС за 1999 - 2009 рр. [14] та гауссової моделі розповсюдження домішок у повітрі з використанням відомої моделі переносу радіонуклідів у рослини через кореневий та стебловий шляхи внаслідок осідання викинутих домішок на поверхню ґрунту та рослини [13]. Верхні оцінки ефективної дози  $E_{st-extr}^{int(ing)}$  розраховані для відстані 2,5 км від ЮУ АЕС та у припущенні, що людина на 100 % споживає продукцією з власних присадибних ділянок. При такому підході ефективна доза внутрішнього опромінення людини  $E_{st-extr}^{int(ing)}$  від перорального надходження  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{110m}\text{Ag}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^3\text{H}$  становить  $(6 \dots 10) \text{ мкЗв} \cdot \text{рік}^{-1}$ . Структура дозового навантаження за радіонуклідами наведена на рис. 1, б: основний внесок (40 %) вносили радіоізотопи цезію ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ), на другому місці –  $^{131}\text{I}$ .

Виходячи з вищенаведеного, можна зазначити, що у формуванні дозового навантаження на людину внаслідок потрапляння в довкілля радіонуклідів з газоаерозольними викидами АЕС ( $E_{st-extr}$ ) беруть участь три складові:

$$E_{st-extr} = E_{st-extr}^{ext} + E_{st-extr}^{int(inhal)} + E_{st-extr}^{int(ing)},$$

кожна з яких, при застосуванні теорії камерних моделей, представляє собою  $n$ -камерну модель переносу радіонуклідів (при цьому зазвичай  $n \gg 3$ ), а визначення коефіцієнтів переносу між камерами потребує радіометрії численної кількості проб, що в цілому ускладнює здійснення прогностичної оцінки дозової ситуації.

Для оперативної орієнтації у формуванні дозової ситуації нами пропонується використувати метод, який заснований на визначенні

показника, який ми пропонуємо називати дозовою ціною джерела випромінювання: *дозова ціна (dose price DP)*  $r_{\omega}$  джерела випромінювання  $\omega$  – це ефективна доза опромінення від певного джерела (у даному випадку – газоаерозольні викиди АЕС), нормалізована на вміст радіонуклідного політанта в об'єкті довкілля, який стоїть на початку дозоформуючого ланцюга. Якщо цей показник визначається для встановлення річної ефективної дози опромінення людини, то він позначається як *середньорічна дозова ціна (DP)*  $r_{\omega T}$ , якщо для очікуваної дози за життя людини, то це виступатиме *очікуваною за життя людини дозовою вартістю (dose cost DC)*  $R_{\omega, 70T}^*$ . Позначення радіонукліда  $i$ , за яким визначається дозова ціна чи дозова вартість, також вноситься в позначення  $r_{\omega}^i$ .

При надходженні в довкілля суміші радіонуклідів пропонується встановлювати базовий радіонуклід  $BR$  (або декілька), який мав більшу вагомість у формуванні сумарної дози та в об'ємі викиду (скиду), та визначити ефективну дозову ціну як зважену суму відповідних величини за окремими радіонуклідами. Так, наприклад, при газоаерозольних викидах радіонуклідів визначали ефективну дозову ціну  $r_{st-extr}^*$  як

$$r_{st-extr}^* = r_{st-extr}^{BR} + r_{st-extr} \cdot \frac{r_{st-extr}^i}{r_{st-extr}^{BR}}, \quad (1)$$

де  $r_{st-extr}^{BR}$  - дозова ціна від викидів радіонукліда  $BR$  з АЕС;  $r_{st-extr}^i$  - дозова ціна від викидів радіонукліда  $i$  з АЕС.

У результаті  $n$ -камерна модель формування дозового навантаження на людину може бути згорнута у трикамерну (рис. 2).

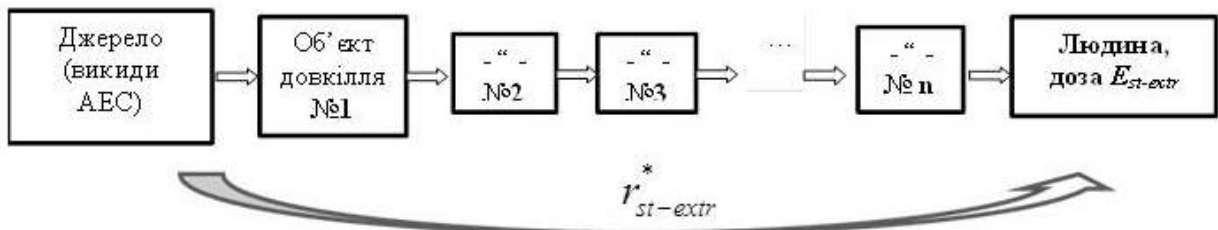


Рис. 2. Схема спрощеного методу прогнозування радіаційного навантаження на людину через показник дозової ціни джерела випромінювання (наприклад, викиди або скиди АЕС).

У запропонованому методі нормалізацію пропонується здійснювати за базовою радіаційною характеристикою  $BRD$ , при визначенні якої виходити з таких принципів:

цей показник повинен характеризувати радіонуклідне забруднення об'єкта довілля, що стоїть на початку дозоформуючого ланцюга;

цей показник повинен враховувати інші чинники, які модифікують вплив радіаційного забруднення цього об'єкта на людину.

За наведеними вище результатами головний внесок (63 %) у формування внутрішнього опромінення при інгаляційному надходженні радіонуклідів  $E_{st-extr}^{int(inhal)}$  надавав на  $^{131}I$  (див. рис. 1, а), тому реперним радіонуклідом за цим шляхом надходження до людини суміші станційних радіонуклідів обрано саме  $^{131}I$ . При пероральному надходженні до людини суміші станційних радіонуклідів через газоаерозольні викиди АЕС найбільший внесок у формування внутрішнього опромінення людини  $E_{st-extr}^{int(ing)}$  надавав  $^{137}Cs$  (33 %), хоча внесок  $^{131}I$  становив близьку величину (29 %) (див. рис. 1, б). Тому нормалізовані ефективні дози від газоаерозольних викидів АЕС для відстані 2500 м від АЕС обчислено як відносно  $^{137}Cs$ , так і відносно  $^{131}I$ .

Базовою радіаційною характеристикою при надходженні радіонукліда  $i$  до людини в результаті газоаерозольних викидів АЕС може бути прийнято величину потужності викиду  $Q_{(st-extr)}^i$  цього радіонукліда з АЕС:  $BRD_{st-extr}^i = Q_{st-extr}^i$  ( $Бк \cdot c^{-1}$ ). Модифікуючими чинниками є фактор метеорологічного розбавлення домішок у приземному шарі атмосфери на певній відстані від АЕС. Нами визначалася величина середньорічної дозової ціни для території радіусом 2500 м навколо ЮУ АЕС, тому можна обмежитися нормалізацією лише за  $Q_{st-extr}^i$  та визначити середньорічну дозову ціну від газоаерозольного викиду радіонукліда  $i$  з АЕС:

$$r_{st-extr}^{i, inhal(ing)} = \frac{E_{st-extr}^{i, inhal(ing)}}{Q_{st-extr}^i}.$$

За формулою (1) отримаємо ефективну середньорічну дозову ціну ( $EDP$ ) від газоаерозольних викидів АЕС відповідно за інгаляційним, харчовим та обома шляхами надходження станційних радіонуклідів до людини –  $r_{st-extr}^{*inhal}$ ,  $r_{st-extr}^{*ing}$ ,

$$r_{st-extr}^{*int} = r_{st-extr}^{*int(inhal+ing)};$$

$$r_{st-extr}^{*inhal} = r_{st-extr}^{BR, inhal} + \sum_{i \neq BR} r_{st-extr}^{BR, inhal} \cdot \frac{Q_{st-extr}^i}{Q_{st-extr}^{BR}},$$

$$r_{st-extr}^{*ing} = r_{st-extr}^{BR, ing} + \sum_{i \neq BR} r_{st-extr}^{BR, ing} \cdot \frac{Q_{st-extr}^i}{Q_{st-extr}^{BR}},$$

$$r_{st-extr}^{*int} = r_{st-extr}^{BR, inhal+ing} + \sum_{i \neq BR} r_{st-extr}^{BR, inhal+ing} \cdot \frac{Q_{st-extr}^i}{Q_{st-extr}^{BR}},$$

де  $Q_{(st-extr)}^i, Q_{(st-extr)}^B$  – потужність викиду в атмосферне повітря радіонукліда  $i$  та базового радіонукліда  $BR$  відповідно,  $Бк \cdot c^{-1}$ .

Результати визначення величини  $r_{st-extr}^{*inhal}$  склали інтервал значень  $(5 - 20) \cdot 10^{-12} Зв \cdot рік^{-1}/Бк \cdot c^{-1}$  (при базовому радіонукліді  $^{137}Cs$ ). Цей широкий інтервал можна пояснити нестабільністю вмісту  $^{131}I$  у повітрі, на що вказують відповідні «зважу-

ючі» коефіцієнти  $\left( \frac{Q_{st-extr}^{131I}}{Q_{st-extr}^{137Cs}} \gg 1 \right)$ . Крім того, спо-

стереження за динамікою дозового навантаження на людину від суміші радіонуклідів ( $E_{st-extr}^{inhal}$ ), яка потрапляла в довілля з газоаерозольними викидами ЮУ АЕС за період 1999 - 2012 рр., у порівнянні з динамікою дозового навантаження від  $^{137}Cs$  ( $E_{st-extr}^{137Cs, inhal}$ ), указали на важливість урахування повного спектра радіонуклідів, які викидаються в довілля (особливо короткоживучих), бо і величина дозового навантаження, і характер його динаміки істотно відрізнялися від відповідних величин для  $^{137}Cs$ . При базовому радіонукліді  $^{137}Cs$  розкид величини  $r_{st-extr}^{*ing}$  був 2 - 12  $мкЗв \times рік^{-1}/Бк \cdot c^{-1}$ .

Порівняння величин  $r_{st-extr}^{*inhal}$  та  $r_{st-extr}^{*ing}$  підтвер-

джує отримані раніше результати про провідну роль харчового ланцюга у формуванні радіаційного навантаження на людину від газоаерозольних викидів радіонуклідів з АЕС. Тому величина середньорічної дозової ціни від газоаерозольних викидів АЕС за обома шляхами надходження радіонуклідів до людини  $r_{st-extr}^{*int} = \frac{E_{st-extr}^{int(inhal)} + E_{st-extr}^{int(ing)}}{Q_{st-extr}^{BR}}$  незначуще відрізняється від

$r_{st-extr}^{*ing}$  та знаходиться в інтервалі 2 - 12 мкЗв × рік<sup>-1</sup> на 1 Бк · с<sup>-1</sup> викиду <sup>137</sup>Cs.

Аналогічні обчислення, які проведені відносно базового радіонукліда <sup>131</sup>I, показали величини  $DP r_{st-extr}^{*ing}$  на рівні 0,05 - 0,70 мкЗв · рік<sup>-1</sup> на 1 Бк × с<sup>-1</sup> викиду <sup>131</sup>I.

Окремо визначено величину  $DP r_{st-extr}^{*ing}$ , що діагностує рівень поверхневого забруднення ґрунту станційними радіонуклідами Зв · рік<sup>-1</sup>/Бк · м<sup>-2</sup>. Базовим радіонуклідом при цьому також прийнято <sup>137</sup>Cs. Визначена таким способом  $DP r_{st-extr}^{*ing}$  від газоаерозольних викидів ІОУ АЕС для території на відстані 2,5 км від АЕС дорівнювала в межах розкиду (0,07 - 1,05) · 10<sup>-6</sup> Зв · рік<sup>-1</sup> на 1 Бк · м<sup>-2</sup> <sup>137</sup>Cs. Потрібно зазначити, що при оцінці внеску газоаерозольних викидів АЕС (зазвичай оцінюється такий внесок за рік) у сумарну річну дозу внутрішнього опромінення людини величину  $DP r_{st-extr}^{*ing}$  потрібно множити не на реальну щільність забруднення цезієм ґрунту, а на дані вимірювань випадінь цезію на планшети (сумарні за рік).

Надійність прогнозування середніх індивідуальних доз для населення з використанням показників  $DP$  перевірена методом стохастичного прогнозування, при застосуванні якого прийнято, що невизначеністю характеризуються такі змінні величини: вміст радіонукліда  $i$  в атмосферному повітрі  $C_{air}^i$ , відношення  $\frac{Q_{st-extr}^i}{Q_{st-extr}^{137Cs}}$ , фактор метеорологічного розбавлення викидних домішок у повітрі  $G$ , а границі змін цих параметрів призначалися як мінімальні та максимальні значення за час проведених досліджень. Здійснюючи 100 випробувань моделі при параметрах, значення яких випадковим чином вибиралися з інтервалів їхніх змін, отримано результати визначення ефективних доз у вигляді статистичних характеристик. Гістограму розподілу результатів моделювання наведено на рис. 3.

Гістограма свідчить про нормальність розподілу даних, а деяка наближеність до логнормальності може вказувати на роль окремих факторів,

не врахованих при моделюванні. Зокрема, це може бути суттєва роль <sup>131</sup>I, <sup>60</sup>Co у дозоутворенні (див. рис. 1), тому рівномірний закон розподілу цих радіонуклідів практично відображується в закон розподілу дозового навантаження.

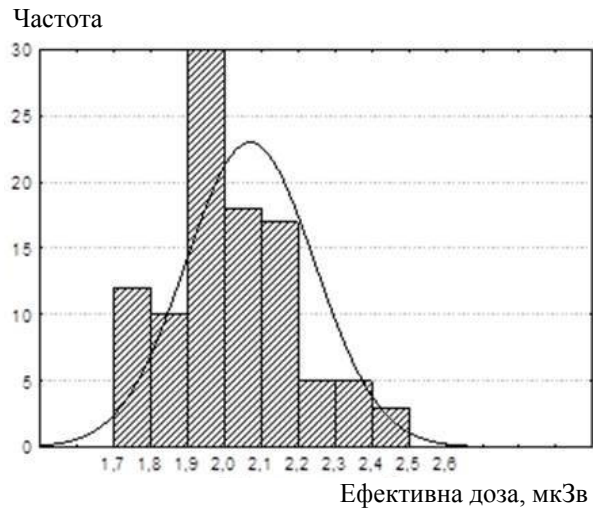


Рис. 3. Гістограма розподілу результатів моделювання формування дозового навантаження  $E_{st-extr}$  на відстані 2,5 км від АЕС унаслідок газоаерозольних викидів радіонуклідів з АЕС.

Визначені величини  $DP$  від газоаерозольних викидів та рідких скидів АЕС дають змогу розрахувати очікувану за життя людини ефективну дозову вартість  $EDP$  газоаерозольних викидів радіонуклідів з АЕС:

$$R_{st-extr,70,T}^* = \int_{t_0}^{t_0+70} \frac{r_{st-extr}^*(t)}{t_0} dt$$

Час інтегрування при цьому взято як період, за який визначається очікувана доза опромінення за НРБУ-97/2000Д – 70 років.

На рис. 4, а представлено динаміку формування  $EDP$  від газоаерозольних викидів радіонуклідів з АЕС  $R_{(st-extr,70,T)}^*$ , яку побудовано при стохастичності параметрів відповідних моделей, що дає змогу оцінити інтервал очікуваної дози. Через те, що в цій динаміці концентруються різні аспекти формування доз (динаміка, перенесення радіонуклідів між об'єктами довкілля, спектр радіонуклідів, різні шляхи опромінення, стохастичність), то, на нашу думку, вона являє собою прогнозну модель оцінки радіоекологічного (еколого-дозового) ризику, за якою можна прогнозувати дозу опромінення людини від хронічного впливу газоаерозольних викидів ІОУ АЕС (тут застосовується термін «ризик» для підкреслення стохастичної природи цього показника, бо він визначає саме ймовірність отримання очікуваної за життя людини дози опромінення).



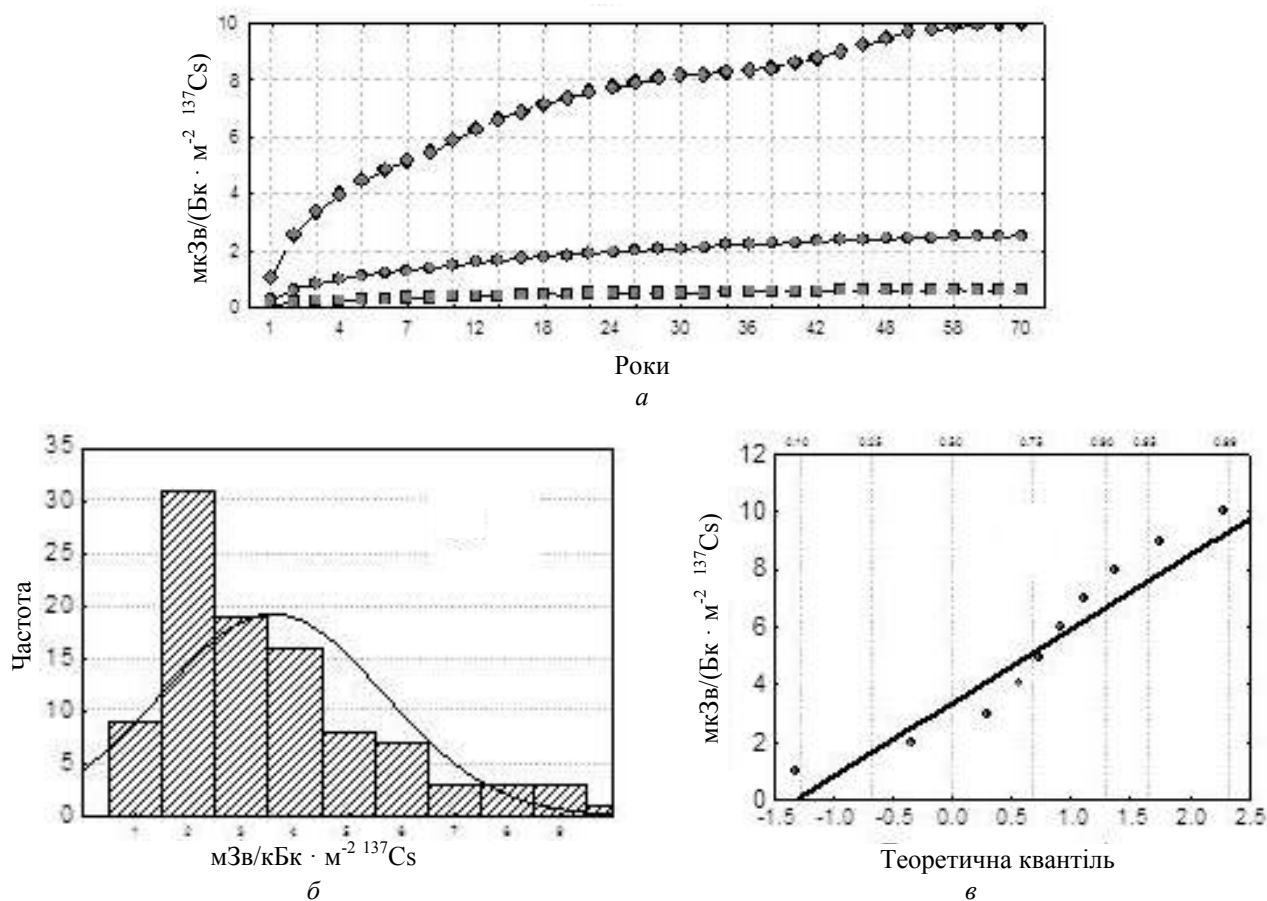


Рис. 4. Стохастичне моделювання динаміки формування очікуваної за 70-річний період життя людини ефективної дози опромінення  $R_{st-extr,70,T}^*$  для територій поблизу ЮУ АЕС (2500 м), мкЗв/кБк · м<sup>-2</sup> <sup>137</sup>Cs: а – динаміка формування дози; б – гістограма розподілу результатів моделювання; в – пробіт-графік результатів моделювання.

Як видно з гістограми (див. рис. 4, б) та пробіт-графіка (в), розподіл результатів моделювання  $DP R_{st-extr,70,T}^*$  є наближеним до нормального, хоча й з достатньо широким розкидом даних. У результаті можна визначити, що  $DC$  від радіонуклідів, що потрапляють у довкілля з газоаерозольними викидами ЮУ АЕС в умовах нормальної роботи станції, становить величину з інтервалу 0,5 - 12,0 мкЗв/кБк · м<sup>-2</sup> <sup>137</sup>Cs.

### Висновки

Експрес-дозиметричну оцінку територій при хронічному надходженні радіонуклідних поллютантів можна здійснювати за допомогою визначення величин дозової ціни та дозової вартості джерела випромінювання, що визначаються як ефективна доза опромінення (річна – для показника дозової ціни, очікувана за життя – для показника дозової вартості) від певного джерела, приведена до одиниці вмісту радіонуклідного поллютанта в об'єкті довкілля, що стоїть на початку дозоформуєного ланцюга.

Оцінка дозового навантаження на людину на підставі визначення показників дозової ціни (дозової вартості) повинна значно полегшити роботу управлінських структур, відповідальних за радіаційний захист населення.

Середньорічна дозова ціна газоаерозольних викидів радіонуклідів з ЮУ АЕС (для територій радіусом 2,5 км від ЮУ АЕС) становить  $(2 - 12) \times 10^{-6}$  Зв · рік<sup>-1</sup> на 1 Бк · с<sup>-1</sup> викиду <sup>137</sup>Cs або  $(0,05 - 0,7) \cdot 10^{-6}$  Зв · рік<sup>-1</sup> на 1 Бк · с<sup>-1</sup> викиду <sup>131</sup>I.

Середньорічна дозова ціна газоаерозольних викидів радіонуклідів з ЮУ АЕС (для територій радіусом 2,5 км від ЮУ АЕС) становить  $(0,07 - 1,05) \cdot 10^{-6}$  Зв · рік<sup>-1</sup> на 1 Бк · м<sup>-2</sup> «станційних» випадів <sup>137</sup>Cs на поверхню ґрунту.

Дозова вартість впливу газоаерозольних викидів радіонуклідів з ЮУ АЕС, в умовах нормальної роботи станції, становить 0,5 - 12,0 мкЗв/кБк · м<sup>-2</sup> <sup>137</sup>Cs.

Отримані значення величин дозових цін та дозової вартості газоаерозольних викидів АЕС характеризують умови саме майданчиків розташування ЮУ АЕС і ЗАЕС і не можуть автоматично застосовуватись для аналогічних оцінок у районах з іншими еколого-географічними характеристиками, зокрема РАЕС і ХАЕС. Це пов'язано насамперед з тим, що коефіцієнти переходу (КП) радіонуклідів «ґрунт - рослина» та, відповідно, доза внутрішнього опромінення суттєво залежать від типу ґрунту, а, як відомо, у ґрунтах Українського Полісся КП можуть бути до 30 разів більшими, ніж у ґрунтах центральної частини України.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. IAEA, 1980. Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting. A Safety Guide. IAEA Safety series No. 50-SG-S3.
2. IAEA, 1982. Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases. Exposures of critical groups. IAEA Safety series No. 57.
3. ICRP Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. - Oxford: Pergamon Press, 1994. - 482 p. (Публикація 66 МКРЗ, Модель респираторного тракта человека для радіологічної захисти).
4. ICRP Publication 67. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2. Ingestion Dose Coefficients. - Oxford: Pergamon Press, 1993. - 166 p. (Публикація 67 МКРЗ, Возраст-зависимые дозы лиц из населения от поступления радионуклидов. - Ч. 2: Дозовые коэффициенты при пероральном поступлении).
5. Використання моделей оцінки радіоекологічного ризику та моделей біодозиметричної оцінки для оптимізації еколого-дозиметричного моніторингу територій при аваріях на ядерних об'єктах: Звіт з НДР (заключ. за 2013 р.) / НІНРТЕБ ЧДУ імені Петра Могили. - 2013. - 90 с.
6. Георгиевский В.Б. Экологические и дозовые модели при радиационных авариях: Монография. - К.: Наук. думка, 1994. - 237 с.
7. Георгиевский В.Б., Дворжак А.И. Стохастическое моделирование радиологических аварий // Электронное моделирование. - 1992. - № 3. - С. 71 - 79.
8. Григор'єва Л.І., Томілін Ю.А. Формування радіаційного навантаження на людину в умовах півдня України: чинники, прогнозування, контрзаходи: Монографія. - Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2009. - 370 с.
9. Григор'єва Л.І. Формування дози внутрішнього опромінення людини від скидів  $^3\text{H}$  з АЕС // Український радіологічний журнал. - 2009. - Т. XVII, вип. 4. - С. 479 - 485.
10. Григор'єва Л.І. Радиационная нагрузка на человека в районе АЭС // Ядерна та радіаційна безпека. - 2010. - № 1 (45). - С. 19 - 24.
11. Григор'єва Л.І. Формирование дозовой нагрузки на человека на территории, подвергающейся выбросам АЭС // Радиационная биология. Радиозкология. - 2010. - Т. 50, № 6. - С. 619 - 632.
12. Ковган Л.М., Лихтар'єв І.А. Чернобыль-орієнтований комплекс еколого-дозиметричних моделей та узагальнені оцінки доз опромінення населення України в результаті Чернобыльської аварії (1986 - 2000 рр.) // Ядерная и радиационная безопасность. - 2004. - Т. 7, вып. 3. - С. 13 - 25.
13. Кутлахмедов Ю.О., Корогодін В.І., Кольтовер В.К. Основи радіоекології: Навч. посіб. / За ред. В. П. Зотова. - К.: Вища шк., 2003. - 319 с.
14. Отчет по радиационной обстановке в районе расположения ЮУ АЭС: Отчет ЛВД ОРБ ОП ЮУ АЭС - 1999 (2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009). - 247 с.
15. Дорошенко Г.Г., Гусев Н.Г., Леонов Е.С., Панченко С.В. Статистические закономерности нормализованных выбросов радиоактивных благородных газов АЭС // Докл. науч.-техн. конф. СЭВ по проблеме «Обеспечение радиационной безопасности при эксплуатации АЭС». Кн. 2. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - С. 176 - 183.

**Л. И. Григор'єва, Ю. А. Томілін, К. В. Григор'єв**

*Черноморский государственный университет имени Петра Могилы, Николаев*

**ЭКСПРЕСС-ПРОГНОЗ ДОЗОВОЙ НАГРУЗКИ НА НАСЕЛЕНИЕ  
ОТ ГАЗОАЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС**

Предложен экспресс-метод прогнозной оценки величины дозовой нагрузки на население с территорий, подвергающихся одновременному влиянию радионуклидных поллютантов естественного и искусственного происхождения. На основании результатов радиоекологических исследований на территориях, подвергающихся воздействию газоаэрозольных выбросов Южно-Украинской и Запорожской АЭС, рассчитаны величины среднегодовой и ожидаемой за жизнь человека нормализованных величин дозовой нагрузки от газоаэрозольных выбросов АЭС, способных облегчить работу системы дозиметрического мониторинга территорий вблизи АЭС.

*Ключевые слова:* эффективная доза, дозовая цена, газоаэрозольные выбросы АЭС, радиационно-экологический мониторинг.

**L. I. Grygorieva, Ya. A. Tomilin, K. V. Grygoriev**

*Petro Mohyla Black Sea State University, Mykolaiv*

**EXPRESS FORECAST OF THE RADIATION STRESS TO THE POPULATION  
FROM NPP GAZOEROSOL EMISSIONS NPP**

Express method of forecast evaluation values of dose load to the population from the territories under the simultaneous influence of radionuclide pollutants natural and artificial origin was proposed. Based on the results of radioecological research in the areas exposed to aerosol emissions of South Ukrainian and Zaporizhzhya NPPs the values and the average human life expectancy for normalized values radiation dose aerosol emissions from nuclear power

plants that can facilitate the work of dosimetric monitoring of areas near nuclear power plants were calculated.

*Keywords:* effective dose, dose price, gas and aerosol emissions from nuclear power plants, radiation and environmental monitoring.

#### REFERENCES

1. *IAEA*, 1980. Atmospherics Dispersion in Nuclear Power Plant Siting. A Safety Guide. IAEA Safety series No. 50-SG-S3.
2. *IAEA*, 1982. Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases. Exposures of critical groups. IAEA Safety series No. 57.
3. *ICRP Publication 66*. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. - Oxford: Pergamon Press, 1994. - 482 p. (Publication 66 of the ICRP, Model for the human respiratory tract radiological protection).
4. *ICRP Publication 67*. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2. Ingestion Dose Coefficients. - Oxford: Pergamon Press, 1993. - 166 p. (Publication 67 of the ICRP, Age-dependent doses to members of the public of radionuclides. - Part 2: Dose coefficients for ingestion).
5. *Assessment models using of the radiological risk and models of biodosimetric evaluation to optimize environmental and dosimetric monitoring of the areas during the accidents at nuclear facilities: Report of the research and development (final for 2013)* / Petro Mohyla Black Sea State University. - 2013. - 90 p (Ukr).
6. *Georgievskij V.B.* Environmental and dose models in radiation accidents: Monograph. - Kyiv: Nauk. dumka, 1994. - 237 p. (Rus)
7. *Georgievskij V.B., Dvorzhak A.I.* // Elektronnoe modelirovanie. - 1992. - No. 3. - P. 71 - 79. (Rus)
8. *Grygor'yeva L.I., Tomilin Yu.A.* Formation of radiation exposure on humans in Southern Ukraine: factors, prognosis, countermeasures: Monograph. - Mykolaiv: Petro Mohyla Black Sea State University, 2009. - 370 p. (Ukr)
9. *Grygor'yeva L.I.* // Ukrayins'kyi radiologichnyi zhurnal. - 2009. - T. XVII, Issue 4. - P. 479 - 485. (Ukr)
10. *Grigor'eva L.I.* // Yaderna ta radiatsiina bezpeka. - 2010. - No. 1 (45). - P. 19 - 24. (Rus)
11. *Grigor'eva L.I.* // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. - 2010. - Vol. 50, No. 6. - P. 619 - 632. (Rus)
12. *Kovgan L.M., Likhtar'ov I.A.* Chernobyl-oriented complex of environmental and dosimetric models and generalized assessment of doses of population of Ukraine as a result of the Chernobyl accident (1986 - 2000) // *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'*. - 2004. - Vol. 7, Issue 3. - P. 13 - 25. (Ukr)
13. *Kutlakhmedov Yu.O., Korogodin V.I., Kol'tover V.K.* Fundamentals of Radiology: Textbook / Ed. by V. P. Zotov. - Kyiv: Vyshcha shkola, 2003. - 319 c. (Ukr)
14. *Report on the radiation situation in the area of the South Ukrainian NPP: Report LVD ORB OP SU NPP - 1999 (2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009).* - 247 p. (Rus)
15. *Doroshenko G.G., Gusev N.G., Leonov E.S., Panchenko S.V.* Statistical regularities of normalized releases of radioactive inert gases of NPP // Lectures of Scientific and Technical Conference of Council for Mutual Economic Assistance on problem "Radiation safety in the operation of NPPs". Book 2. - Moskva: Energoatomizdat, 1983. - P. 176 - 183. (Rus)

Надійшла 15.04.2014

Received 15.04.2014