

ПРОГНОЗНІ ДОЗИМЕТРИЧНІ МОДЕЛІ У СИСТЕМІ КОНТРЗАХОДІВ ВПЛИВУ ТЕХНОГЕННО-ПІДСИЛЕНИХ ДЖЕРЕЛ ПРИРОДНОГО ПОХОДЖЕННЯ

На підставі результатів тривалого вивчення шляхів формування дозового навантаження на півдні України від техногенно-підсилених джерел радіоактивних природного походження у статті представлено метод оперативного прогнозування рівнів опромінення людини від радону-222.

Ключові слова: радон-222, ефективна доза, дозова ціна, контрзаходи.

На основании результатов продолжительного изучения путей формирования дозовой нагрузки на юге Украины от техногенно-усиленных источников радиоактивных природного происхождения. В статье представлен метод оперативного прогнозирования уровней облучения человека от радона-222.

Ключевые слова: радон-222, эффективная доза, дозовая цена, контрмеры.

In the article it is reflected the results of researches of the dose loading are resulted on people which work on the granit careers of region, through the inhalation and peroral (with a drinking-water) receipt of ^{222}Rn in the workplace and at home, and also as a result of external irradiation from technogenic increased sources of natural origin. Counter-measures are offered for a deloading id radon for this population.

Key words: radon-222, granite quarries, effective dose, counter-measures.

Радіаційний ризик від природних радіоактивних джерел на півдні України спричинений геологічними особливостями північних районів регіону та підвищенням, внаслідок цього, вмістом природних радіоактивних елементів (^{233}U , ^{226}Ra , ^{232}Th) у геологічних породах [2], у підземних водах [13], а також присутністю у регіоні підприємств гранітодобувної і гранітопереробної галузі [270]. Це обумовлює наявність вірогідності опромінення від ^{222}Rn та дочірніх продуктів його розпаду (ДПР) людей, які мешкають на цих територіях. За даними вітчизняних авторів [9-12, 13] сумарна річна доза від природних радіонуклідів в Україні складає $6,15 \text{ мЗв} \cdot \text{рік}^{-1}$. За оцінками НКДАР ООН [7] внесок радону з ДПР у дозу опромінення населення планети від природних джерел становить 54 %. В Україні радон досягає 79 % ($4,2 \text{ мЗв}$) величини вказаної дози і близько 60 % середньої ефективної дози від усіх джерел [13].

Через широке розвинення у цих районах гранітодобувної і гранітопереробної галузей, а також через заплановане введення у найближчий час у регіоні підприємств уранодобувної галузі, одними з актуальних питань радіаційної безпеки і радіаційної гігієни регіону є питання, які стосуються прогнозування дозового навантаження від ^{222}Rn з ДПР на робітників цієї галузі.

Мета досліджень полягала у розробці методу оперативного прогнозування дозового навантаження від ^{222}Rn з ДПР.

Матеріали та методи дослідження

Одним з методів, які дозволяють оперативно прогнозувати радіаційну ситуацію і радіаційне навантаження на людину, є метод, заснований на визначенні коефіцієнтів переходу від радіаційних характеристик джерела іонізуючого випромінювання – до ефективної дози опромінення людини. Для оперативної орієнтації у рівнях радіаційного навантаження на населення, постраждалого внаслідок аварії на ЧАЕС, в якості таких коефіцієнтів виступали нормалізовані ефективні дози – ефективні дози, віднесені до щільності випадіння радіонуклідів (в одиницях $\text{Зв/Бк} \cdot \text{м}^{-2}$).

Принцип нормалізації також використовувався в узагальненій доповіді НКДАР ООН при аналізі даних аварії на ЧАЕС [335]. Тому одне з завдань роботи полягало у встановленні коефіцієнтів (нормалізованих ефективних доз), які дозволятимуть оперативно прогнозувати ефективну дозу опромінення людини від техногенно-підсилених джерел іонізуючого випромінювання. Для визначення нормалізованих ефективних доз від природних та техногенних джерел іонізуючого випромінювання вста-

новлювали показники, які виступали базовими радіаційними характеристиками цих джерел. Визна-

чення нормалізованих ефективних доз опромінення людини здійснювали наступним чином:

$$e_{i-n} = \frac{E_{i,n}^{inhal(ing)}}{BRD_{i-n}} = e_i \cdot I_{i,n}^{inhal(ing)}, \quad (1)$$

де e_{i-n} – «дозова ціна» джерела n іонізуючого випромінювання за радіонуклідом i , $Зв \cdot рік^{-1} / Бк \cdot м^{-2}$, $Зв \cdot рік^{-1} / Бк \cdot м^{-1}$, $Зв \cdot рік^{-1} / Бк \cdot л^{-2}$ залежно від BRD_n ;

$E_{i-n}^{inhal(ing)}$ – річна ефективна доза (РЕД) внутрішнього опромінення людини внаслідок інгаляційного або перорального надходження радіонукліду i до людини від джерела випромінювання n , $Зв \cdot рік^{-1}$;

BRD_{i-n} – базова радіаційна характеристика природного джерела n іонізуючого випромінювання, визначена за радіонуклідом i , $Бк \cdot м^{-3}$, $Бк \cdot м^{-2}$, $Бк \cdot л^{-1}$;

e_i – дозовий коефіцієнт інгаляційного чи перорального надходження радіонукліду i до людини;

$I_{i,n}^{inhal(ing)}$ – нормалізоване на BRD_n річне надходження радіонукліду i до людини.

Нормалізація виконувалася за базовою радіаційною характеристикою (BRD) джерела випромінювання. При цьому враховано шляхи формування радіаційного навантаження від техногенно-підсиленних джерел природного походження (ТПДПП) (рис. 1).

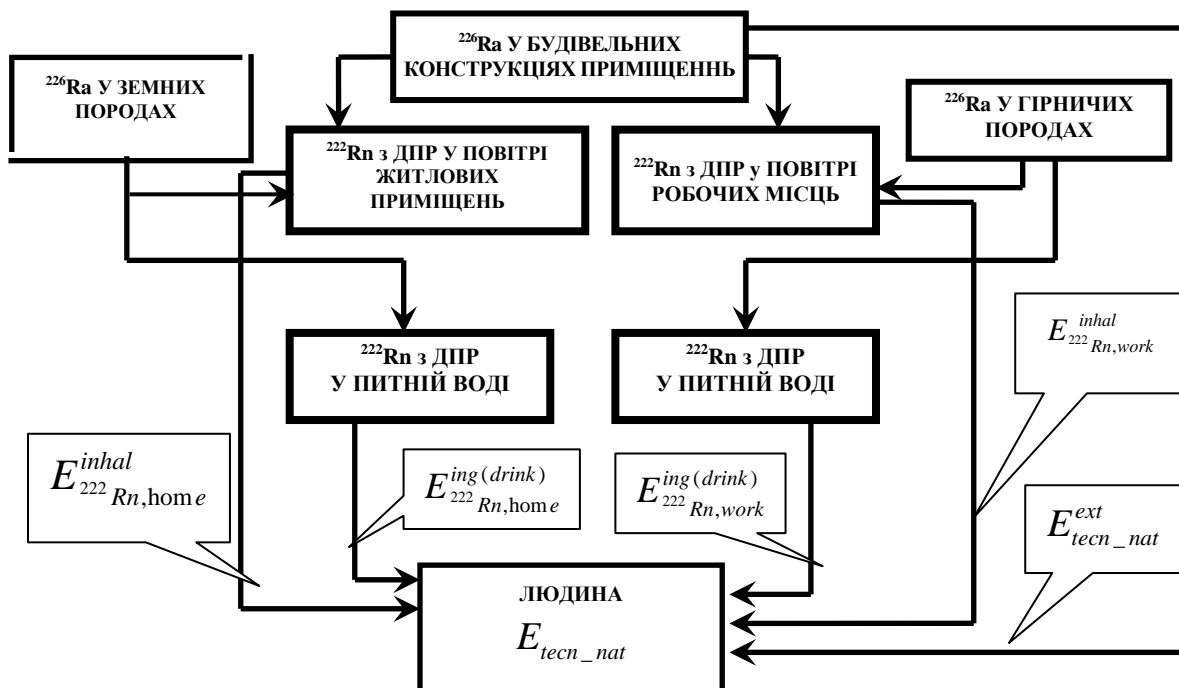


Рис. 1. Блок-схема формування радіаційного навантаження від техногенно-підсиленних джерел природного походження: $E_{222\text{Rn,home}}^{inhal}$, $E_{222\text{Rn,work}}^{inhal}$ – РЕД від інгаляційного надходження ^{222}Rn і ДПР з повітрям житлового та робочого приміщення відповідно; $E_{222\text{Rn,home}}^{ing(drink)}$, $E_{222\text{Rn,work}}^{ing(drink)}$ – РЕД від надходження ^{222}Rn з питною водою вдома і на робочому місці відповідно; $E_{tecn_nat}^{ext}$ – РЕД зовнішнього опромінення на робочому місці; E_{tecn_nat} – інтегральна РЕД зовнішнього і внутрішнього опромінення людини.

З рис. 1 видно, що повне радіаційне навантаження на людину від радіонуклідів природного походження представляє собою суму навантажень від природних радіоактивних джерел і від техногенно-підсиленних радіоактивних джерел природного походження. Через те, що основний внесок у дозу внутрішнього опромінення людини від природних джерел радіації вносить ^{222}Rn , то дослідження з визначення нормалізованих ефективних доз здійснені для ^{222}Rn .

Визначення нормалізованих ефективних доз здійснювали за результатами досліджень еквівалентної рівноважної об'ємної активності (ЕРОА) ^{222}Rn у повітрі робочих приміщень, на робочих місцях основних груп працівників гранкар'єрів (Первомайського гранітного і Первомайського гранітно-

щебеневого кар'єрів, Олександрівського, Прибузького, Софіївського, Ново-Данилівського гранітних кар'єрів), результати досліджень ЕРОА ^{222}Rn у повітрі житлових приміщень цих робітників, результати досліджень вмісту ^{222}Rn у питній воді, яка використовується цими працівниками вдома і на гранкар'єрах.

Важливою умовою прогнозування за допомогою дозиметричних моделей є їхня надійність. У роботі застосовано методику статистичного експерименту, за якою параметри переносу радіонуклідів і співвідношення $\frac{BRD_{i-n}}{BRD_{BR-n}}$ рандомізувалися шляхом дослідження величин їх статистичних характеристик, і для кожного випадкового набору параметрів моде-

лювалися дози, результати обробляли як статистичний матеріал [28-30]. Розгляд дозових прогнозів у межах стохастичних моделей широко розповсюджені у науковій літературі, а також рекомендується документами МКРЗ [163] і НКДАР ООН [119].

Верифікація прогнозних дозиметричних моделей, побудованих за (6.3), основу яких складають визначені «дозові ціни» техногенних і природних джерел іонізуючого випромінювання, виконана відомими способами через перевірку збіжності результатів моделювання та результатів реальних досліджень.

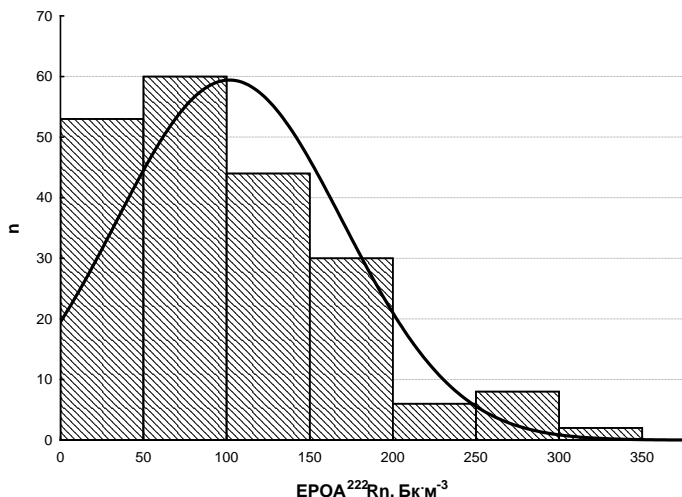
Результати моделювання визначалися при стохастизації відповідних моделей. Алгоритмічно процедура стохастизації полягала у тому, що детерміністичні моделі були реалізовані при параметрах, які випадковим чином вибиралися з діапазону їхніх змін, отриманого дослідним шляхом. Об'єм вибірки для усіх стохастичних моделей був прийнятий у розмірі 100 [29]. При стохастизації параметрів використано рівномірний закон розподілу, який відповідає найбільш консервативним припущенням про невизначеність параметрів моделі [163].

При стохастичному моделюванні усі статистичні характеристики (середнє, мода, медіана, стандартне відхилення, дисперсія, геометричне середнє, мінімум, максимум, кватилі) мають певний змістовний вміст, тому моделі супроводжуються відповідними таблицями цих статистичних характеристик. В результаті якості моделювання оцінювалася статистичними характеристиками модельованої дози у порівнянні з відповідними характеристиками дози, визначеної за результатами натурних досліджень.

У підсумку результати моделювання формування очікуваної за 70-річний період життя людини ефективної дози представлені гістограмами розподілу доз і пробіт-графіками.

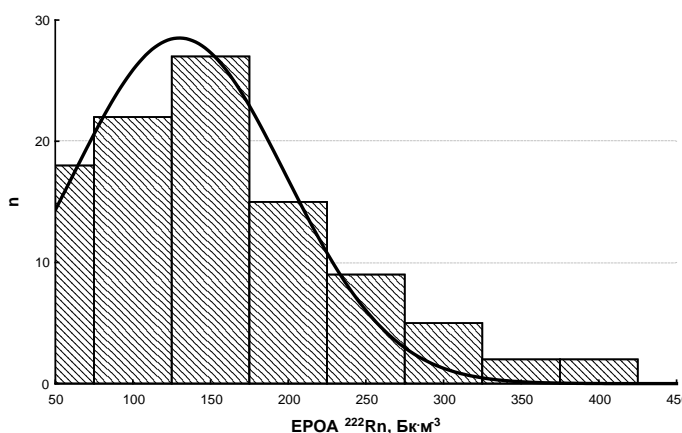
Результати досліджень та їх обговорення

Результати досліджень вказали на логнормальний розподіл вимірів ЕРОА ^{222}Rn у повітрі житлових приміщень, з середньгеометричним значенням близько $100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ (рис. 1), і на робочих місцях, з середньозваженим за кар'єрами значенням $137 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ (рис. 2), робітників гранкар'єрів у північних районах Миколаївської області.



Середньгеометричне значення
 ЕРОА ^{222}Rn – $97 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$
 Геометричне стандартне
 відхилення – $72 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$
 Максимальне значення – $334 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$

Рис. 1. Частотний розподіл результатів визначення ЕРОА ^{222}Rn у повітрі житлових приміщень



Середньозважене за кар'єрами
 значення ЕРОА ^{222}Rn – $137 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$
 Геометричне стандартне відхилення –
 $67 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$
 Максимальне значення – $355 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$

Рис. 2. Частотний розподіл результатів визначення ЕРОА ^{222}Rn у повітрі робочих місць працівників гранітних кар'єрів

Це вказало на двофакторність інгаляційного надходження ^{222}Rn з ДПП (вдома і на робочому

місці) до людини, яка працює на гранітних кар'єрах. Середньозважена за кар'єрами РЕД від інгаляційного

надходження ^{222}Rn з повітрям робочих місць ($E_{^{222}\text{Rn,work}}^{\text{inhal}}$) складала $2,1 \pm 0,2 \text{ мЗв}\cdot\text{рік}^{-1}$ (при діапазоні $0,9 - 5,9 \text{ мЗв}\cdot\text{рік}^{-1}$); з повітрям житлових приміщень ($E_{^{222}\text{Rn,home}}^{\text{inhal}}$) $4,1 \pm 0,2 \text{ мЗв}\cdot\text{рік}^{-1}$ (при діапазоні $1,8-9,7 \text{ мЗв}\cdot\text{рік}^{-1}$).

Також встановлено двофакторність надходження ^{222}Rn з ДПР пероральним шляхом (при споживанні питної води) до цієї категорії людей. Сумарна доза від ^{222}Rn з ДПР ($E_{^{222}\text{Rn}}$), за середньозваженими показниками склала $6,2 \pm 0,6 \text{ мЗв}\cdot\text{рік}^{-1}$ (при діапазоні $5-17 \text{ мЗв}\cdot\text{рік}^{-1}$) (рис. 3).

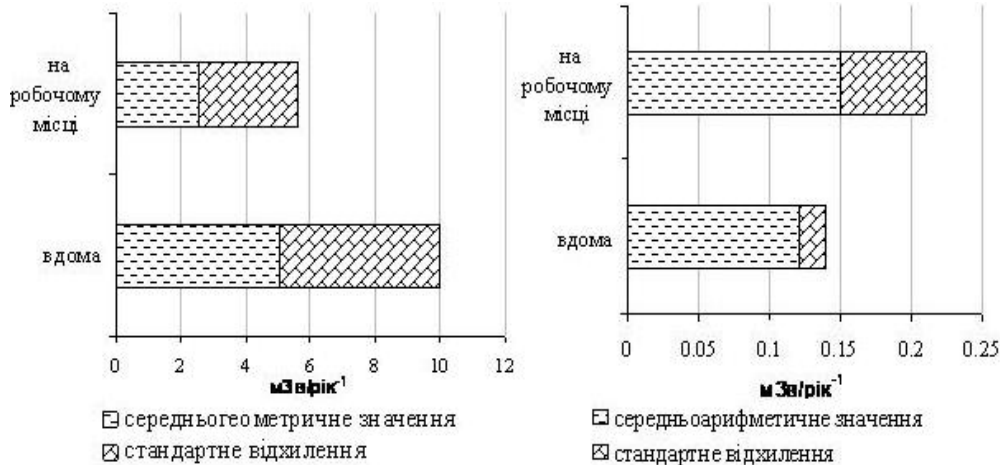


Рис. 3. Двофакторність навантаження від ^{222}Rn на працівників гранітних кар'єрів (вдома і на робочому місці): А) від інгаляційного надходження ^{222}Rn ; Б) від надходження ^{222}Rn з питною водою

Ці результати склали підставу для визначення дозової ціни опромінення людини від радону. Через те, що більш високі рівні ЕРОА ^{222}Rn спостерігалися в одноповерхових домах, то дозова ціна «радонової» компоненти опромінення людини від ТПДПП у житловому приміщенні $e_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}}$ визначалася для одноповерхових житлових будинків.

Виходячи з визначення базової радіаційної характеристики, як радіаційної характеристики об'єкту довкілля, що стоїть на початку дозоформуючого ланцюга, відповідно до рис. 1. можна прийняти $\rho_{^{226}\text{Ra}}$ (поверхневу активність ^{226}Ra у підстиляючих земних породах) та $C_{^{226}\text{Ra}}$ (вміст ^{226}Ra у матеріалі конструкцій будівлі).

Однак через те, що вміст ^{222}Rn у будівлі, крім ексхалції з-під землі та еманції з будівельних матеріалів конструкцій, залежав від інших чинників (тип фундаменту, використання газових плит, наявність вентиляції, метеорологічні параметри та ін.), то для визначення базової радіаційної характеристики ($BRD_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}}$) результати визначення ЕРОА ^{222}Rn у повітрі житлових будинків класифіковано відповідно до типу матеріалу конструкцій будівлі (саман, гранітні породи, бетон, ракушняк, цеглина, білий камінь) та виділених радоновизначальних умов приміщення, пов'язаних з герметичністю підлоги і наявністю періодичної вентиляції простору під

підлогою. Такі умови систематизовано за створеною шкалою герметичності підлоги:

- 0 – відсутність вентиляованих підвальних приміщень, дерев'яна підлога без додаткового покриття;
- 1 – відсутність вентиляованих підвальних приміщень, дерев'яна підлога з лінолеумним покриттям;
- 2 – підвал під приміщенням (вентиляція непотійна), дерев'яна підлога з покриттям лінолеумом;
- 3 – вентиляований підвал або наявність дренажу під приміщенням, настил на підлозі (ламінат, паркет).

Слайн-моделювання вмісту ^{222}Rn у повітрі таких житлових приміщень залежно від «радоновизначальних» умов наведено на рис. 5.

Відповідно до такої класифікації визначено параметр $K_{^{222}\text{Rn-home}}$ – параметр комбінованого впливу «радоновизначальних» умов житла (поверх, вид будівельного матеріалу m конструкцій будівлі та обробки стін, герметичність підлоги і наявність та періодичність вентиляції простору під підлогою або підвальних приміщень K) (табл. 1).

Тому $BRD_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}}$ можуть виступати $\rho_{^{226}\text{Ra}}$ (поверхнева активність ^{226}Ra у породах під будинком)

та $K_{^{222}\text{Rn-home}}$: $BRD_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}} = \rho_{^{226}\text{Ra}} \cdot K_{^{222}\text{Rn-home}}$, а $e_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}}$ за визначається, як:

$$e_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}} = \overline{E_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}}} = \frac{E_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}}}{(\rho_{^{226}\text{Ra}} \cdot K_{^{222}\text{Rn-home}})} = e_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}} \cdot \frac{C_{^{222}\text{Rn}}^{\text{air}}}{\rho_{^{226}\text{Ra}} \cdot K_{^{222}\text{Rn-home}}}$$

Використовуючи вищенаведені результати визначення $E_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}}$ та $K_{^{222}\text{Rn-home}}$ (табл. 1) обчислено

статистичні характеристики результатів визначення $e_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}}$ наведено у табл. 2.



Рис. 5. Сплайн – моделювання залежності ЕРОА ^{222}Rn від «радонівизначальних» умов приміщення

Таблиця 1

Величини параметру $K_{^{222}\text{Rn-home}}$ для одноповерхових будівель з матеріалу m та герметичності K підлоги приміщення (середні значення та інтервал коливань)

Герметичність підлоги K за шкалою	Саман	Саман (гранітний фундамент)	Білий камінь	Цеглина	Бетон
0	8 (5-10)	8 (5-50)	6 (5-10)	6 (3-10)	8 (6-10)
1	4 (2-5)	8 (5-10)	3 (2-5)	2 (2-3)	3 (2-6)
2	2 (1,5-3)	5 (3-10)	1 (1-2)	1 (1-2)	2 (1-2)
3	–	–	< 1	< 1	< 1

Таблиця 2

Статистичні характеристики визначення $e_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}}$ ($\text{мЗв}\cdot\text{рік}^{-1}$ на $1 \text{кБк}\cdot\text{м}^{-2} \text{ } ^{226}\text{Ra}$ та $K_{^{222}\text{Rn,home}}$)

Статистична характеристика	$e_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}}$
Середнє арифметичне	0.05
Медіанне середнє	0.04
Модальне середнє	0.05
Стандартне відхилення	0.018
Мінімум	0.01
Максимум	0.12

Для більш точного прогнозування за величинами дозових цін $e_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{inhal}}$ доцільно замість показника $\rho_{^{226}\text{Ra}}$ використовувати показники вмісту ^{222}Rn в ґрунтовому повітрі або потоку ^{222}Rn з поверхні, а також додатково застосувати параметри, які визначають інтенсивність ексхаляції з ґрунту, з будівельних конструкцій [197, 198, 203, 205].

Виходячи з того, що основним чинником підвищеного вмісту ^{222}Rn у підземних водних джерелах

виступає вміст ^{226}Ra у підземних породах, то $\rho_{^{226}\text{Ra}}$ може виступати базовою радіаційною характеристикою при прогнозуванні ефективної дози опромінення людини від ^{222}Rn у питній воді з підземних джерел ($E_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{ing(drink)}}$). Аналогічним чином визначено «довозу ціну «радонової» компоненти» опромінення людини від ТПДПП через питну воду ($e_{^{222}\text{Rn-home}}^{\text{ing(drink)}}$) (табл. 3).

Таблиця 3

Статистичні характеристики визначення $e_{222Rn-home}^{ing(drink)}$ ($МЗв\cdot рік^{-1}$ на $1\text{кБк}\cdot м^{-2}\cdot 226\text{Ra}$)

Статистична характеристика	$e_{222Rn-home}^{ing(drink)}$
Середнє арифметичне	0,0025
Медіанне середнє	0,0003
Модальне середнє	0,0025
Стандартне відхилення	0,0008
Мінімум	0,001
Максимум	0,02

Вираз для прогнозування повної ефективної дози від ^{222}Rn за «дозовими цінами» $e_{222Rn-home}^{inhal}$, $e_{222Rn-home}^{ing(drink)}$ має вигляд:

$$E_{222Rn-home} = e_{222Rn-home}^{inhal} \cdot \rho_{226Ra} \cdot K_{222Rn-home} + e_{222Rn-home}^{ing(drink)} \cdot \rho_{226Ra} \quad (1)$$

де $E_{222Rn-home}$ – річна ефективна доза опромінення людини від надходження ^{222}Rn інгаляційним шляхом і з питною водою, $Зв\cdot рік^{-1}$.

Встановлення провідної ролі ^{222}Rn при формуванні радіаційного навантаження на людину від ТПДПП забезпечили вибір ^{222}Rn базовим радіонуклідом при прогнозуванні радіаційного навантаження на людину від ТПДПП:

$$E_{tecn-nat} = \eta \cdot (e_{222Rn-home}^{inhal} \cdot \rho_{226Ra} \cdot K_{222Rn-home} + e_{222Rn-home}^{ing(drink)} \cdot \rho_{226Ra}) \quad (2)$$

де $E_{tecn-nat}$ – річна ефективна доза опромінення людини від ТПДПП, $Зв\cdot рік^{-1}$;

η – коефіцієнт, який враховує внесок ^{222}Rn у дозу від ТПДПП: відповідно до результатів досліджень дорівнює 1,1 – 1,2.

Дозиметричну модель (2) позначимо $DM_{tecn-nat}$. Через встановлені результати щодо близькості внесків ^{222}Rn у житлових приміщеннях (36-50 %) та ^{222}Rn у виробничих приміщеннях (50-59 %) у «радонову» дозу опромінення для працівників гранітних кар'єрів, при оперативній оцінці повного навантаження від ^{222}Rn для цієї категорії працівників можна використовувати модель (2), збільшивши при цьому результати ~ 2 рази.

Надійність прогнозування і верифікація результатів моделювання за $DM_{tecn-nat}$. У моделі (2) невизначеністю характеризуються ρ_{226Ra} , $K_{222Rn-home}$, $e_{222Rn-home}^{inhal}$, $e_{222Rn-home}^{ing(drink)}$, η . Середні значення та границі змін цих параметрів наведено у таблицях 1-3 (границі змін цих параметрів призначалися як мінімальні і максимальні значення за результатами досліджень).

Здійснюючи 100 випробувань моделі (2) при параметрах, які випадковим чином відбиралися з інтервалів їхніх коливань, для одноповерхових будівель з різних будівельних матеріалів (саман, білий камінь, ракушняк, цегла та бетонні блоки) у таблиці 4. наведено статистичні характеристики модельованої річної ефективної дози $E_{tecn-nat}^{home}$ через «دوزи дозові ціни» $e_{222Rn-home}^{inhal}$, $e_{222Rn-home}^{ing(drink)}$. У цій таблиці також наведено результати визначення дози $E_{tecn-nat}^{home}$ безпосередньо за результатами досліджень. ЕРОА ^{222}Rn у повітрі таких житлових приміщень (при розмірах виборок даних від 41 до 67). Як видно, майже усі статистичні характеристики модельованої дози $E_{tecn-nat}^{home}$ показали близькість до результатів, отриманих під час досліджень.

Побудовано гістограми розподілу результатів прогнозування річних ефективних доз від ^{222}Rn для радононосних провінцій півдня України при стохастизації моделі (2). Типовий вигляд цього розподілу наведено на рис. 6.

Таблиця 4

Статистичні характеристики визначення РЕД $E_{tecn-nat}^{home}$ (за стохастизацією моделі $DM_{tecn-nat}$) (I) та результатами реальних досліджень (II) ($Зв\cdot рік^{-1}$)

Статистична характеристика	Саман		Білий камінь		Цегла звичайна		Ракушняк		Бетонні блоки	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Розмір вибірки	100	41	100	53	100	67	100	49	100	48
Середнє значення	7,6	7,9	3,8	3,5	3,4	3,5	3,6	3,2	4,6	4,1
Медіанне середнє	6,7	7,7	3,3	3,2	3,3	3,4	3,4	3,0	3,7	3,9
Модальне середнє	9,2	8,7	3,6	3,5	3,4	3,6	3,5	3,1	3,8	4,0
Геометричне середнє	8,1	8,4	3,9	3,7	3,5	3,8	3,4	3,7	3,9	4,1
Стандартне відхилення	2,6	2,4	1,7	1,5	1,4	1,7	1,3	1,6	1,6	1,5
Дисперсія	5,8	5,9	2,89	2,25	1,96	2,89	1,69	2,56	2,56	2,25
Мінімальне значення	3,0	2,8	2,7	2,1	3,0	2,4	3,0	2,8	2,9	3,0
Максимальне значення	11,8	12,0	6,5	6,2	5,9	6,1	4,8	4,9	4,8	5,4
Нижня квартиль	3,2	2,5	1,6	1,5	2,3	2,5	1,8	2,0	3,1	2,9
Верхня квартиль	8,4	8,9	4,8	5,1	5,1	4,7	3,6	4,1	4,7	4,4

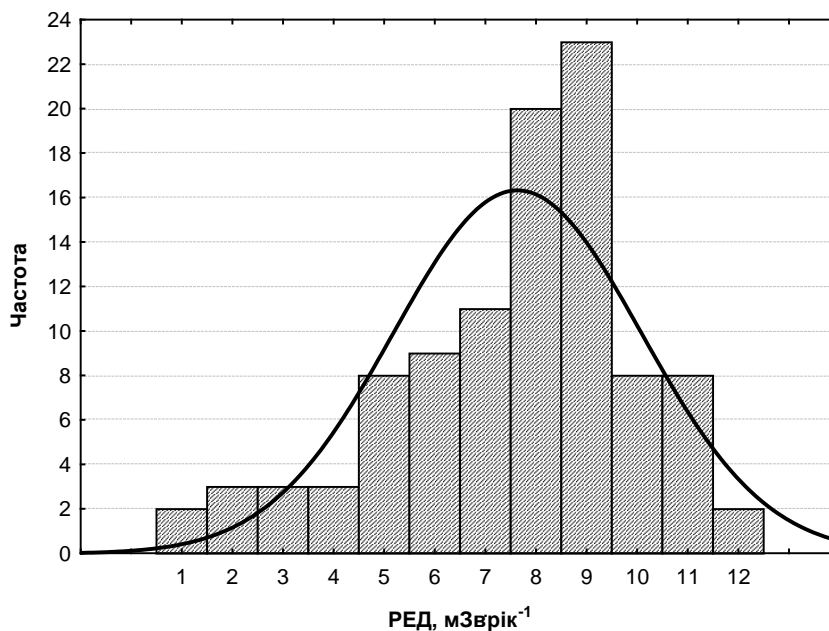


Рис. 6. Гістограма розподілу результатів стохастичного прогнозування річної ефективної дози (РЕД) від ^{222}Rn для радононосних районів (типовий вигляд)

Як видно з рис. 6., цей розподіл результатів моделювання підпорядковується нормальному закону розсіювання даних. Деякі відхилення від нормального розподілу можна пояснити значною варіабельністю великої кількості факторів, які впливають на насичення радоном приміщень, та логнормальним розподілом результатів досліджень ЕРОА ^{222}Rn у повітрі житлових приміщень.

– **Очікуване за життя інтегральне радіаційне навантаження на людину від ТПДПП в умовах півдня України.** Встановлені «дозові ціни» дозволяють визначити очікувану за 70-річний період життя людини ефективну дозу опромінення від ТПДПП. Шляхом інтегрування (2) отримаємо величину очікуваного за життя радіаційного навантаження на людину від ТПДПП ($E_{\text{tecn-nat},70,T}^{\text{home}}$). Час інтегрування при цьому взято як період, за який визначається очікувана доза опромінення за НРБУ-97/Д-2000 [173] – 70 років: $E_{n,70,T} = \int_{t_0}^{t_0+70} E_n(t)dt$. Аналогічним

чином можна визначити «дозову ціну» хронічного опромінення людини від ТПДПП: $e_{n,70,T}^* = \int_{t_0}^{t_0+70} e_n^*(t)dt$.

При цьому внаслідок того, що у стохастичних моделях дозових цін хронічного опромінення людини $e_{n,70,T}^*$ концентруються різні аспекти формування доз (динаміка, перенесення радіонуклідів між об'єктами довкілля, різні шляхи опромінення, стохастичність), тому вони можуть являти собою модель радіоекологічного ризику впливу ТПДПП. Так, при стохастичному моделюванні динаміки формування дози $e_{\text{tecn-nat},70,T}^*$ отримаємо модель радіоекологічного ризику від ТПДПП для радононосних районів півдня України.

Динаміку формування очікуваних доз $E_{n,70,T}$ та «дозових цін» хронічного опромінення людини $e_{n,70,T}^*$ побудовано при стохастизації параметрів відповідних моделей, що дозволяє оцінити інтервал очікуваної дози. Для працівників гранітних кар'єрів очікувану за життя дозу від ТПДПП на виробництві (очікувану професійну дозу) $E_{\text{tecn-nat},70,T}^{\text{work}}$ визначали виходячи з середнього часу роботи на виробництві 25-30 років. В результаті очікувана за 70-річний період життя людини доза хронічного опромінення від ТПДПП у житлових приміщеннях $E_{\text{tecn-nat},70,T}^{\text{home}}$ для радононосних територій склала 0,06-0,92 Зв; величина дози $E_{\text{tecn-nat},70,T}^{\text{work}}$ склала 0,1-0,2 Зв, а сума $E_{\text{home},70,T}^{\text{tecn-nat}}$ та $E_{\text{work},70,T}^{\text{tecn-nat}}$ дає очікувану за життя ефективну дозу від ТПДПП $E_{\text{tecn-nat},70,T}$ для працівників гранітних кар'єрів: 0,16-1,12 Зв. Модель радіоекологічного ризику від ТПДПП наведено на рис. 7.

Широкі інтервали коливань очікуваного за життя людини радіаційного навантаження від ТПДПП вказують, що оцінки його рівнів за середніми величинами не завжди адекватно відображують ситуацію, бо навіть наближеність до нормального отриманого розподілу результатів прогнозування доз (рис. 7, Б) свідчить, що завжди існує певна кількість людей, яка отримує дози, що можуть суттєво відрізнятися і бути у декілька разів вищими за середні величини. Тобто завжди виявляються індивідуми, які зазнають значно більших рівнів опромінення.

Додаючи до цього індивідуальні зміни радіочутливості і наявність серед населення найчутливіших груп: вагітних жінок, дітей, пенсіонерів, хворих тощо, стає логічною необхідність розробки системи захисту від радіаційного фактору не за середніми, а за максимальними показниками радіаційного наван-

таження. Особливо це стосується людей, які живуть і працюють в умовах підвищеного впливу техногенно-підсиленних джерел природного походження. Так, у структурі інтегральної річної і інтегральної очікуваної за життя ефективної дози опромінення людини на

півдні України суттєвим є внесок ^{222}Rn : 45 % у річній дозі, 58 % – в очікуваній за життя, при чому внесок «промислового» радону достатньо великий: у річній – 34 %, в очікуваній за життя – 17 % (рис. 8).

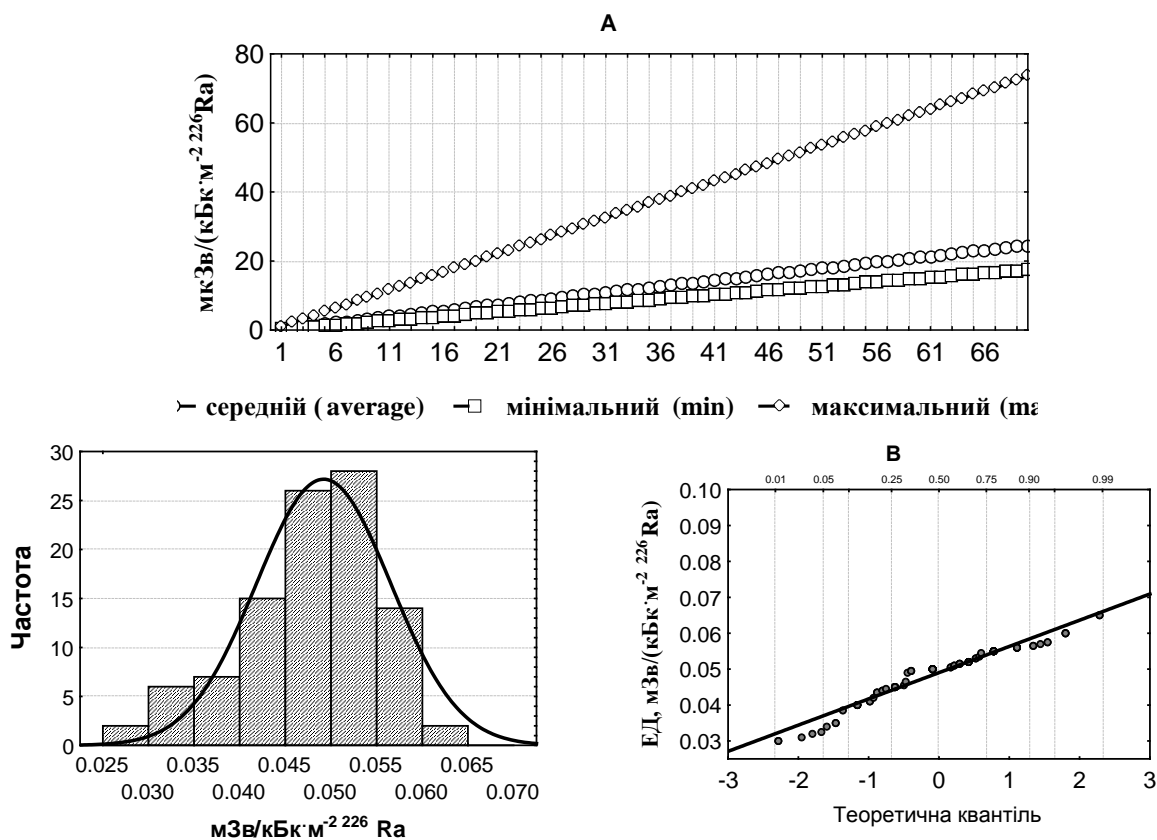


Рис. 7. Стохастичне моделювання динаміки формування дози $e_{тесн-nat,70,T}^*$ (радіоекологічний ризик) від ТПДПП для радононосних районів, мЗв/кБк·м⁻²·²²⁶Ra: А – динаміка формування дози, Б – гістограма розподілу результатів моделювання, В – пробіт-графік результатів моделювання

Тому оперативне прогнозування здійснюється через визначені «дозові ціни» джерел випромінювання задля реалізації принципу оптимізації радіаційної безпеки система управління радіаційним навантаженням на населення півдня України, при прогнозуванні дозової ситуації та визначенню інтегрального радіаційного навантаження на людину.

Висновки

1. Річна ефективна доза зовнішнього опромінення від ТПДПП для працівників гранітних кар'єрів складала, в середньому: на Первомайському, Прибузькому, Олександрівському, Ново-Данилівському гранітних кар'єрах, $0,32 \pm 0,05$ мЗв·рік⁻¹; на Софіївському – $0,42 \pm 0,04$ мЗв·рік⁻¹.
2. Середньозважена за кар'єрами величина ЕРОА ^{222}Rn на робочих місцях становила 129 ± 2 Бк·м⁻³. Середньозважена за кар'єрами величина ЕРОА ^{222}Rn у житлових приміщеннях складала 96 ± 2 Бк·м⁻³.
3. Працівники гранітних кар'єрів отримують подвійне радіаційне навантаження від ^{222}Rn (на робочих місцях і вдома). Середньозважена за кар'єрами величина радіаційного навантаження від інгаляційного надходження ^{222}Rn з повітрям робочих місць

- складала $2,1 \pm 0,2$ мЗв·рік⁻¹ (при розкиді від 0,9 до 5,9 мЗв·рік⁻¹). Середньозважена за кар'єрами величина радіаційного навантаження від інгаляційного надходження ^{222}Rn з повітрям житлових приміщень складала $4,1 \pm 0,2$ мЗв·рік⁻¹ (при розкиді від 1,8 до 9,7 мЗв·рік⁻¹). Сумарна ефективна доза внутрішнього опромінення від надходження ^{222}Rn з повітрям робочих і житлових приміщень та з питною водою становила, в середньому, $6,5 \pm 0,2$ мЗв·рік⁻¹, а максимальні величини склали близько 15 мЗв·рік⁻¹.
4. При оцінці радіаційного навантаження на людей, які працюють на підприємствах гранітодобувної, уранодобувної галузей необхідно обов'язково враховувати можливість подвійного опромінення від ^{222}Rn (на роботі і вдома).
 5. Пропонується внести зміни у регламентацію опромінення людей, які живуть на територіях з підвищеним вмістом природних радіонуклідів і працюють у гранітодобувній, гранітопереробній, уранодобувній галузі, в першу чергу, через зниження гранично-допустимої дози від ^{222}Rn з ДПР на робочих місцях та зниження тривалості робочого часу на робочих місцях з підвищеним рівнем ^{222}Rn .

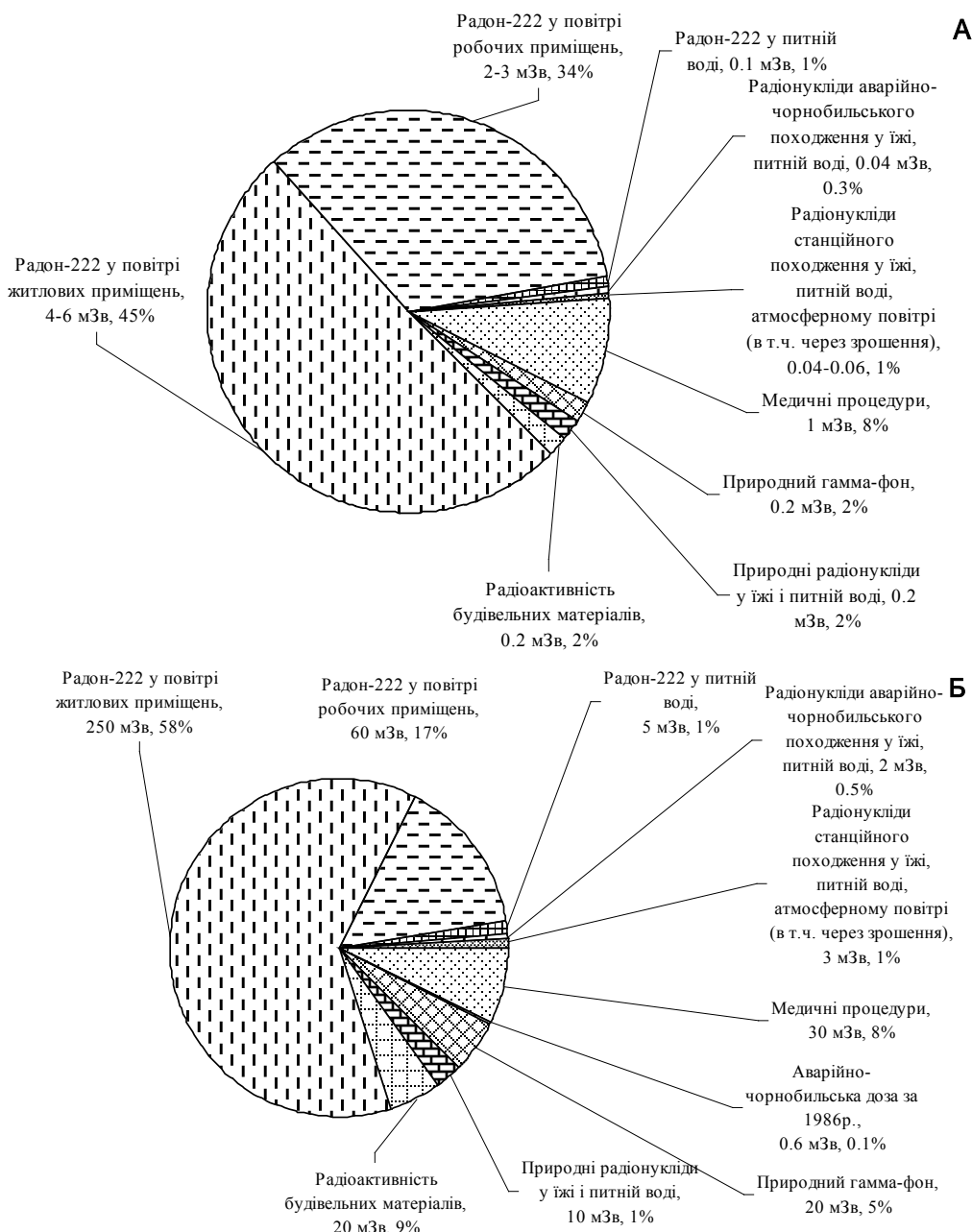


Рис. 8. Структура середньорічної (А) і очікуваної за життя (Б) ефективної дози опромінення населення радонебезпечних районів півдня України

6. Пропонується: забезпечити цілодобову вентиляцію (природну або примусову) виробничих приміщень, герметизацію кабін бульдозерів, екскаваторів і автотранспорту, які працюють в кар'єрах, з одночасним встановленням в них кондиціонерів з фільтром; обладнати локальними повітрявсмоктувальними пристроями пневмоінструменти дробильників і бурильників; забезпечити працівників кар'єрів бутильованою водою та будувати виробничі приміщення

на високому фундаменті з газоізоляцією підлоги і вентиляцією підбудинкового простору.

Виходячи з перспектив держави щодо розширення уранодобувної галузі у регіоні, введення у дію найбільшого в Європі Новокостянтинівського родовища у Миколаївській області, потрібно, щоб державною радоноювою програмою були враховані усі радонозахисні заходи і рекомендації.

ЛІТЕРАТУРА

1. ICRP Publication 65 (Annals of the ICRP Vol. 23 № 2) Protection Against Radon-222 at Home and at Work.– Vienna: Pergamon, 1994. – 78 p.
2. Effects of Radiation on the Environment. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR (2000) Report to the General Assembly with Scientific Annex. – New York: UN, 2000.

3. Pavlenko T. A., Los I. P., Aksenov N. V. Ignor – Rn levels and irradiation doses in the territory of the Ukraine // Radiation Measurements. – 1996. – Vol. 26. – P. 585-591.
4. Григор'єва Л. І., Томілін Ю. А. Доза випромінювання ²²²Rn в окремих районах півдня України // Науковий вісник Волинського національного університету імені Лесі Українки. – № 1. – Луцьк – 2008. – С. 291-294.
5. Григор'єва Л. І., Томілін Ю. А. Сумарна доза іонізуючого випромінювання від компонент природного і штучного походження для населення півдня України // Вісник проблем біології і медицини. – 2008. – Вип. 1. – С. 70-74.
6. 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.
7. *Ионизирующее* излучение: источники и биологические эффекты // Доклад НКДАР ООН за 1994 г. на Генеральной Ассамблее. – Нью Йорк, 1995.
8. *Картирование* территории Николаевской области по суммарной дозовой нагрузке на население: Отчет о НИР (промеж.) / Никол. науч.-исслед. лабор. по проблемам радиационной безопасности населения «Ларани» – № 5197/1 – Николаев, 2000. – 58 с.
9. Лось І. П., Павленко Т. А. Ограничение облучения человека техногенно-усиленными источниками природного происхождения // Довкілля та здоров'я, 2003. – Вип. 1. – С. 49-54.
10. Лось І. П., Михайлов О. В., Байда Л. К., Костенко А. І., Грицак Л. П. Порівняльний аналіз сумарних колективних та ретроспективно відновлених діапазонів доз опромінення населення, що постраждало від аварії на ЧАЕС // Гігієна населених мест. – Київ, 2000. – Вип. 36., Ч. 1. – С. 30-37.
11. Лось І. П., Осадча О. М. Основні напрями розробки національної протирадонової програми // Наукові записки. Серія: Біологія та екологія. – 2006. – Т. 18. – С. 63-66.
12. *Норми радіаційної безпеки України* (НРБУ – 97/2000Д). – Київ: МОЗ України, 2000. – 135 с.
13. Павленко Т. А., Лось І. П. Существующие дозы облучения населения Украины // Ядерна та радіаційна безпека – № 1 – 2009. – С. 18–22.

Рецензенти: Кутлахмедов Ю. О., д.б.н., професор;
Томілін Ю. А., д.б.н., професор

© Григор'єва Л. І., 2011

Стаття надійшла до редколегії 05.06.2011 р.