

РАДІОЕКОЛОГІЧНИЙ РИЗИК У ПРОГНОЗУВАННІ ФОРМУВАННЯ ДОЗОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Григор'єва Л. І., Стеценко Д. А.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

вул. 68 Десантників, 10, 54003, м. Миколаїв

ludmila.grygorieva@chmnu.edu.ua

Сьогодні, в умовах зростаючих темпів виробництва та погіршення екологічної ситуації через воєнну агресію РФ, загальна кількість несприятливих факторів і речовин різної природи безперервно зростає. До таких впливів відносять й іонізуюче випромінювання: людина у районах з нормальним рівнем природної радіації отримує індивідуальну дозу біля 2,4 мЗв/рік і до середини життя накопичує дозу порядку 0,1 Зв, які пов'язують з детерміністичними радіаційними ефектами. А в умовах хронічного надходження у довкілля радіонуклідних поллютантів від техногенних джерел ризику таких ефектів зростають. Тому прогнозування радіоекологічної ситуації займає важливу роль серед задач радіоекологічної безпеки територій. При дозиметричному моделюванні найчастіше використовують метод концептуальних (камерних) моделей перенесення радіонуклідів у довкілля з подальшим відображенням у дозу опромінення людини.

У роботі розвинуто методологію оперативної оцінки радіоекологічної ситуації через визначення нормалізованих показників ефективної дози іонізуючого випромінювання. Введено поняття радіоекологічного ризику – ефективної дози, нормалізованої за вмістом реперного радіонукліду в об'єкті довкілля, що стоїть на початку дозоформуючого ланцюгу. Визначено середньорічний індивідуальний радіоекологічний ризик газоаерозольних викидів та рідких скидів АЕС. Показано, що за показниками радіоекологічного ризику можна порівнювати радіаційні ситуації від одного джерела на різних територіях. Серед кількох шляхів формування дози опромінення людини від ^{137}Cs з АЕС найбільший за значенням ризик формується через перехід ^{137}Cs зі зрошувальної води у сільгоспрослини (20–260) мкЗв/(Бк · м²). Також це дозволяє прогнозувати очікуване за життя людини радіаційне навантаження. За результатами моделювання очікуване за життя людини радіаційне навантаження внаслідок надходження у довкілля радіонуклідів з газоаерозольними викидами АЕС для територій радіусом 2,5 км навколо АЕС склало 25 ± 5 мкЗв. *Ключові слова:* радіоекологічний ризик, радіонуклідні поллютанти, доза опромінення, прогнозування, модель.

Radioecological risk in forecasting the formation of dosage load from ionizing radiation sources. Grygorieva L., Stetsenko D.

Today, with production rates on the rise and the environment getting worse because of Russia's military aggression, the number of bad stuff and substances of all kinds keeps growing. These influences include ionising radiation: a person in areas with normal levels of natural radiation receives an individual dose of about 2.4 mSv/year and by middle age accumulate a dose of about 0.1 Sv, which is associated with deterministic radiation effects. And in conditions of chronic release of radionuclide pollutants from man-made sources into the environment, the risks of such effects increase. Therefore, forecasting the radioecological situation plays an important role among the tasks of radioecological safety of territories. In dosimetric modelling, the most commonly used method is that of conceptual (chamber) models of radionuclide transport in the environment, with subsequent reflection in the radiation dose to humans.

The paper develops a methodology for operational assessment of the radioecological situation by determining normalised indicators of effective dose of ionising radiation. The concept of radioecological risk has been introduced – the effective dose normalised by the content of the reference radionuclide in the environmental object at the beginning of the dose-forming chain. The average annual individual radioecological risk of gas-aerosol emissions and liquid discharges from nuclear power plants is determined. It is shown that radioecological risk indicators can be used to compare radiation situations from a single source in different territories. Among several ways of forming the human exposure dose from ^{137}Cs from nuclear power plants, the greatest risk is formed through the transfer of ^{137}Cs from irrigation water to agricultural crops (20–260) $\mu\text{Sv}/(\text{Bq} \cdot \text{m}^2)$. It also allows predicting the expected radiation exposure during a person's lifetime. According to the modelling results, the expected radiation exposure during a person's lifetime due to the release of radionuclides into the environment with gas-aerosol emissions from the NPP for areas within a radius of 2.5 km around the NPP was 25 ± 5 μSv . *Key words:* radioecological risk, radionuclide pollutants, radiation dose, forecasting, model.

Постановка проблеми. Прогнозування стану довкілля, зокрема для територій, що зазнають впливу хронічного впливу від ядерних установок, виступає важливим засобом забезпечення безпеки при використанні ядерної енергії. Основною метою такого прогнозування є перспективна оцінка дозового навантаження на людину і екосистеми задля своєчасного виявлення небажаних наслідків і своєчас-

ного прийняття відповідних управлінських рішень. Прогнозування здійснюється, зазвичай, на підставі результатів радіаційно-екологічного моніторингу. Як відомо, за своїм призначенням такий моніторинг виступає також головною інструментальною ланкою в управлінні станом навколишнього середовища на територіях, які зазнають хронічного впливу радіонуклідних поллютантів. Так, радіаційно-екологічний

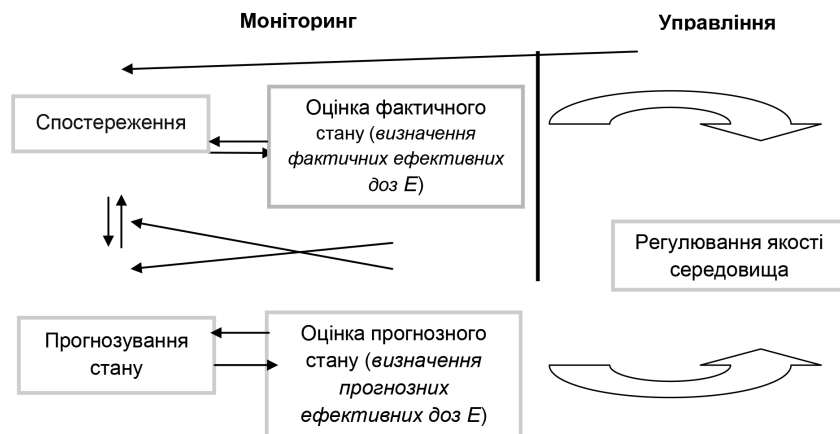


Рис. 1. Роль радіоекологічного моніторингу у системі управління якістю навколишнього середовища [3]

моніторинг, відповідно до сучасного уявлення про його роль у системі управління якістю навколишнього середовища (рис. 1), повинен забезпечувати регулярне оцінювання і прогнозування радіаційного стану середовища для прийняття управлінських рішень щодо радіаційної і радіоекологічної безпеки, визначення величин фактичних і очікуваних та прогнозних індивідуальних і колективних доз опромінення.

Однак, навіть при сучасній системі організації моніторингу, управління екологічною безпекою довкілля містить певні проблеми з прийняття рішень. До таких проблем відносять проблематичність визначення, оцінки та оперативної орієнтації і прогнозування дозової ситуації, тобто проблематичність швидкого визначення взаємозв'язку між камерами «Спостереження» і «Оцінка прогнозного стану» на рис. 1. Це обумовлено, по-перше, багатофакторністю формування радіаційної ситуації на територіях, де населення зазнає одночасного впливу: через скиди і викиди діючих АЕС, ТЕС, через техногенно-зміненний природний радіаційний фон, через наслідки «аварійно-чорнобильського» викиду радіонуклідів. В результаті камера «Спостереження» потребує проведення численних радіометричних і спектрометричних аналізів різноманітних проб довкілля. По-друге, це обумовлено різноманітністю міграційних шля-

хів цих радіонуклідних поллютантів у довкіллі та різноманітністю шляхів потрапляння до людини. Так, найпростішою камерною моделлю формування радіаційного навантаження на людину від наземних джерел випромінювання, що поєднує екологічні особливості міграції радіонуклідів між компонентами біосфери з дозиметричними характеристиками опромінення людини, є шестикамерна модель між джерелом випромінювання і людиною (рис. 2). На ній позначено камери, між якими здійснюється перенесення радіонуклідів від джерела до людини (повітря, ґрунт, продукти харчування) та параметри, які характеризують інтенсивність цього перенесення k . Це приклад найпростішої камерної моделі, бо розподіл радіонуклідів у кожній з камер є складним і динамічним процесом, тому кожна з них може налічувати в собі декілька підкамер, які також характеризуються відповідними коефіцієнтами перенесення радіоактивності k .

Тому головна складність при такому моделюванні полягає у визначенні коефіцієнтів перенесення радіонуклідів між камерами, чому й присвячені наші дослідження.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю пошуку методів оперативного прогнозування та моделювання стану довкілля територій, якій зазнають хронічного впливу радіонуклідних поллютантів.



Рис. 2. Багатокамерна модель перенесення радіоактивності при формуванні радіаційного навантаження на людину від наземних джерел випромінювання

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Методологічні результати дослідження сприятимуть розробці методики оперативного або експрес-оцінювання радіаційного стану територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нами проаналізовано останні публікації оцінки та прогнозування радіаційних наслідків при аваріях на АЕС [1]; оцінювання розповсюдження радіоактивності у довкіллі та впливу на людину [2–5]; методики, які використовуються для виявлення радіаційного забруднення місцевості, прогнозування та оцінки наслідків аварій АЕС [6, 7]. Також проаналізовано сучасні методики оцінки та прогнозування радіаційної обстановки внаслідок надзвичайних ситуацій [7]. Ці матеріали використовують сучасні методи дозиметрії територій, які базуються на виявленні радіонуклідного забруднення в об'єктах довкілля та не завжди враховують можливості імітаційного моделювання за допомогою камерних моделей від джерела опромінення до людини.

Сьогодні визнано, що побудова ефективної системи протирадіаційного захисту включає визначення основних дозоформуючих чинників опромінення людини і вибір оптимальних сценаріїв зниження радіаційних ризиків.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Недостатньо вивченими залишаються питання оцінювання стану атмосферного повітря за вмістом радіонуклідних поллютантів. Так, зокрема, не вивченим є поєднання/співставлення результатів фіксованих вимірювань хімічних поллютантів в атмосферному повітрі з результатами індикативних вимірювань.

Новизна. Із залученням даних наукової літератури розширено уявлення про використання методів нормалізації показників ефективної дози для створення методології оперативного прогнозування радіоекологічної ситуації.

Методологічне або загальнонаукове значення. Результати мають закласти основу методології оперативного прогнозування радіоекологічної ситуації, проводячи польові дослідження лише одного (реперного) радіонукліду в одному об'єкті довкілля – того, що стоїть на початку дозоформуючого ланцюгу.

Викладення основного матеріалу. Для оперативної орієнтації у формуванні дозової ситуації нами пропонується використовувати метод, який заснований на визначенні показника, який ми називаємо радіоекологічним ризиком джерела випромінювання: радіоекологічний ризик (або інтегральний дозовий ризик) $r_{rad-eco}^i$ джерела випромінювання i – це ефективна доза опромінення від певного джерела, нормалізована на вміст (приведена до одиниці вмісту) радіонуклідного поллютанта в об'єкті довкілля, який стоїть на початку дозоформуючого ланцюгу. Одиницею вимірювання $r_{rad-eco}^i$ виступає Зв/(Бк/м³) – при потраплянні радіонуклідів у довкілля через їх викиди в атмосферне повітря; Зв/(Бк/л) – при потраплянні радіонуклідів у довкілля через їх скиди у водні об'єкти т. ін. Якщо ризик визначається для встановлення річної ефективної дози опромінення людини, то це позначається як річний радіоекологічний ризик, якщо для очікуваної за життя людини – це виступатиме очікуваним за життя людини радіоекологічним ризиком.

При надходженні у довкілля суміші радіонуклідів встановлювали базовий радіонуклід BR (або декілька) – який мав більшу вагомість у формуванні сумарної дози і в об'ємі викиду (скиду), та визначали ефективний радіоекологічний ризик ($r_{rad-eco}^*$), як зважену суму відповідних радіоекологічних ризиків за окремими радіонуклідами:

$$r_{rad}^* = r_{rad-eco}^{BR} + \sum_{i \neq BR} \left(r_{rad-eco}^i \times \frac{r_{rad-eco}^i}{r_{rad-eco}^{BR}} \right),$$

де $r_{rad-eco}^{BR}$ – радіоекологічний ризик при базовому радіонукліді BR .

В результаті n -камерна модель формування дозового навантаження на людину може бути згорнута у 3-камерну (рис. 3).

Потрібно зазначити, що принцип приведення (нормалізації) дозового навантаження використовувався при оперативній орієнтації у рівнях радіаційного навантаження на населення, постраждалого внаслідок аварії на ЧАЕС, коли в якості таких коефіцієнтів виступали ефективні дози, нормалізовані на щільність випадіння радіонуклідів; цей принцип також використовувався в узагальненій доповіді НКДАР ООН при аналізі даних аварії на ЧАЕС.

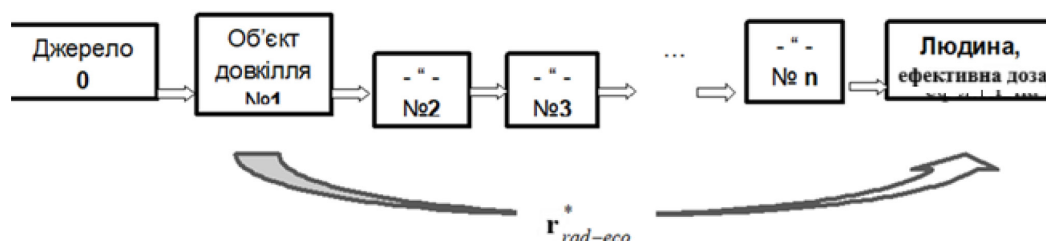


Рис. 3. Схема спрощеного визначення радіаційного навантаження на людину через показники радіоекологічного ризику джерела випромінювання r_{rad}^*

Середньорічний індивідуальний радіоекологічний ризик (СІРР) газоаерозольних викидів та рідких скидів АЕС

Позначення	Назва	BR	Інтервал значень
СІРР від газоаерозольних викидів та рідких скидів АЕС			
$r_{st-extr}^*$, Зв · рік ⁻¹ на 1 Бк · с ⁻¹ викиду ¹³¹ I з АЕС	СІРР від <i>газоаерозольних викидів АЕС</i> (^{137,134} Cs, ^{58,60} Co, ⁵⁴ Mn, ⁵¹ Cr, ⁵⁹ Fe, ⁹⁵ Nb, ^{110m} Ag, ¹³¹ I, ³ H) (для відстані 2,5 км від АЕС)	¹³¹ I	(0,05–0,7) · 10 ⁻⁶
$r_{st-extr}^*$, Зв · рік ⁻¹ на 1 Бк · м ⁻² ¹³⁷ Cs на поверхні ґрунту	СІРР від <i>газоаерозольних викидів АЕС</i> (для відстані 2,5 км від АЕС)	¹³⁷ Cs	(0,8–4,8) · 10 ⁻⁶
r_{ir}^* , Зв · рік ⁻¹ на 1 $\frac{\text{Бк}}{\text{л}}$ ¹³⁷ Cs у зрошувальній воді та 1 $\frac{\text{м}^2}{\text{кг}}$ переходу ¹³⁷ Cs зі зрошувальної води у сільгоспрослини)	СІРР від зрошення сільськогосподарських культур	¹³⁷ Cs	(90–195) · 10 ⁻³

За результатами радіоекологічних досліджень територій на півдні України визначено величини середньорічного індивідуального радіоекологічного ризику внаслідок різних шляхів потрапляння радіонуклідів у довкілля (табл. 1): при викидах і скидах

Південноукраїнської (ПУ) АЕС – $r_{st-extr}^*$, при потрапленні радіонуклідів у воду, яка використовується для зрошення сільськогосподарських угідь – r_{ir}^* .

Ці показники склали основу інструменту, за яким можна оперативно встановлювати та порівнювати

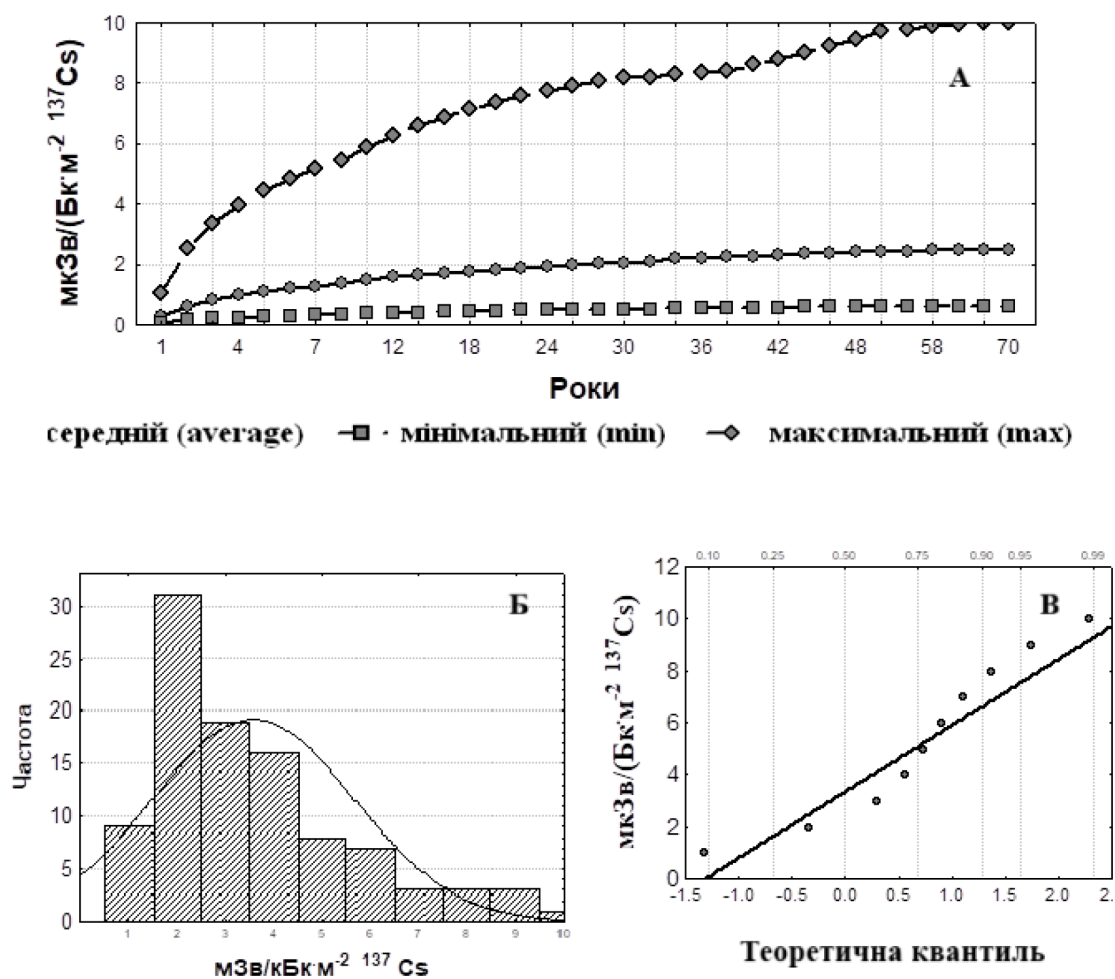


Рис. 4. Стохастичне моделювання динаміки формування очікуваної за 70-річний період життя людини дози $r_{st-extr, 70T}^*$ (радіоекологічний ризик) для територій поблизу ПУ АЕС (2,5 км навколо АЕС), мкЗв/(кБк · м²) ¹³⁷Cs: А – динаміка формування дози, Б – гістограма розподілу результатів моделювання, В – пробіт-графік результатів моделювання

радіаційні ситуації від одного джерела на різних територіях, порівнювати значимість («цінність») для людини різних чинників опромінення. Так, серед кількох шляхів формування дози опромінення людини від ^{137}Cs з АЕС найбільший за значенням ризик формується через перехід ^{137}Cs зі зрошувальної води у сільгоспрослини: внаслідок газоаерозольних викидів АЕС за верхніми оцінками (для відстані 2,5 км від АЕС) – $(1-10) \text{ мкЗв/Бк} \cdot \text{м}^{-2}$, а «через зрошення» – $(20-260) \text{ мкЗв/Бк} \cdot \text{м}^{-2}$. Також можна порівнювати між собою радіоекологічний ризик від різних джерел іонізуючого випромінювання, а також від аналогічних джерел.

Також це дозволяє прогнозувати очікуване за життя людини радіаційне навантаження. Так, визначене за середніми значеннями очікуване за життя людини радіаційне навантаження внаслідок надходження у довкілля радіонуклідів з газоаерозольними викидами АЕС для територій радіусом 2,5 км навколо АЕС склало, в середньому, $25 \pm 5 \text{ мкЗв}$, а враховуючи результати стохастизації параметрів відповідної моделі діапазон значень склав 6–78 мкЗв.

Модель радіоекологічного ризику від радіонуклідів, що потрапляють у довкілля з газоаерозольними викидами АЕС в умовах нормальної роботи станції, наведено на рис. 4. На рис. 4, А показано радіоекологічний ризик від забруднення територій радіусом 2,5 км навколо АЕС внаслідок надходження у приземний шар атмосфери радіонуклідів з газоаерозольними викидами АЕС в умовах нормальної роботи АЕС: показано максимальні (min), середні (average) і мінімальні (min) величини. На рис. 4, Б та рис. 4, В наведено гістограму та пробіт-графік розподілу

результатів моделювання очікуваного за життя людини радіоекологічного ризику. Як видно з цих рисунків, розподіл результатів моделювання наближений до нормального, хоча і з достатньо широким розкидом даних.

Головні висновки.

1. Розвинуто методологію оперативної оцінки радіоекологічної ситуації через визначення нормалізованих показників ефективної дози іонізуючого випромінювання. Нормалізація здійснюється на вміст радіонуклідного полютанта в об'єкті довкілля, який стоїть на початку дозоформуєного ланцюгу.

2. Визначено середньорічний індивідуальний радіоекологічний ризик газоаерозольних викидів та рідких скидів АЕС: $(0,8-4,8) \cdot 10^{-6}$ і $(90-195) \cdot 10^{-3} \text{ Зв/(Бк} \cdot \text{м}^2)$.

3. За показниками радіоекологічного ризику можна порівнювати радіаційні ситуації від одного джерела на різних територіях. Серед кількох шляхів формування дози опромінення людини від ^{137}Cs з АЕС найбільший за значенням ризик формується через перехід ^{137}Cs зі зрошувальної води у сільгоспрослини $(20-260) \text{ мкЗв/(Бк} \cdot \text{м}^2)$.

4. Визначене очікуване за життя людини радіаційне навантаження внаслідок надходження у довкілля радіонуклідів з газоаерозольними викидами АЕС для територій радіусом 2,5 км навколо АЕС складає, в середньому, $25 \pm 5 \text{ мкЗв}$.

Перспективи подальших досліджень.

Продовження досліджень з моделювання радіоекологічної ситуації та визначення радіоекологічного ризику для інших міграційних шляхів радіоактивних полютантів, в тому числі тих, які пов'язані з техногенно-підсиленними природними джерелами іонізуючого випромінювання.

Література

1. Cherniavskiy I., Chomik M., Tiutiunyk V., Rolin I., Starenkiy V. Experimental evaluation of accuracy in determining the direction to a pulsed source of gamma-radiation by a spherical absorber with CdTe detectors in a system of nuclear situation monitoring. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. No. 4/5 (106). P. 16–24. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210665>
2. Cherniavskiy I., Vinnikov V. Prognostic assessment of the zone of occurrence of radiation combined injuries within a nuclear blast area. *International Journal of Radiation Biology*. 2021. No. 98(5). P. 878–889. <https://doi.org/10.1080/09553002.2021.1998707>
3. Nagarkar V., Squillante M., Entine G., Stern I., Sharif D. CdTe detectors in nuclear radiation dosimetry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 1992. No. 322(3). P. 623–627. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(92\)91242-2](https://doi.org/10.1016/0168-9002(92)91242-2)
4. Брикульська М. В., Дефорж Г. В. Загрози радіоактивного випромінювання: особливості впливу на навколишнє середовище та здоров'я людини. *Public Health Journal*. 2023. № 3. С. 4–13. <https://doi.org/10.32782/pub.health.2023.3.1>
5. Кондратюк В. А., Іванов В. С. Оцінка радіаційних наслідків при важких аваріях на атомних електростанціях. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 4. С. 134–139. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2018.175649>
6. Поплавець С. І., Гузченко С. В., Чепурний В. П. Методика прогнозування положення осі сліду від радіоактивного і хімічного зараження довкілля з урахуванням часової та просторової мінливості середнього вітру. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2024. № 1 (79). С. 108–112. <https://doi.org/10.30748/zhups.2024.79.16>
7. Триснюк В. М., Нагорний С. І., Триснюк Т. В., Конечька О. О., Курило А. В. Методика виявлення радіаційного забруднення місцевості та його ризиків. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. № 3 (69). С. 112–115. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.112>

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025