

ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ РАДІАЦІЙНОЇ ЄМНОСТІ ЛАНДШАФТУ ТА ЙОГО КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ ОЦІНКИ РАДІАЦІЙНОГО РИЗИКУ ЗОВНІШНЬОГО ОПРОМІНЕННЯ ЛЮДИНИ І БІОТИ Й ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ВИКИДІВ АЕС

Барбашев С.В., Бурбан Н.С.

Національний університет «Одеська політехніка»

пр. Шевченка, 1, 65044, м. Одеса

barbashev@op.edu.ua, josik65@gmail.com

У статті запропоновано модель радіаційної ємності ландшафту та його компонентів, яка відрізняється від моделей, запропонованих іншими авторами, тим, що вона враховує розміри і властивості як ландшафту, так і його компонентів. Крім того, ця модель дозволяє враховувати масштаби міграції радіонуклідів і їх максимальне накопичення в них, яке зіставляється з рівнем негативного впливу забруднювачів на біотичні елементи та людину, що притаманні території, яка піддається радіаційному забрудненню.

Показано, що, знаючи радіаційну ємність компонента ландшафту, можна визначити рівень максимального накопичення радіонуклідів у компонентах природного середовища, що перебувають у зоні впливу АЕС, яка працює у штатному режимі, а також отримати значення індивідуального радіаційного ризику від зовнішнього опромінення населення та наземної біоти, що знаходяться на території зони спостереження АЕС.

Оцінювання величини радіаційної ємності та ризику виконано за допомогою даних комплексного радіоекологічного моніторингу територій розташування АЕС, методологія якого розроблена на кафедрі АЕС Одеського політехнічного інституту (нині Національний університет «Одеська політехніка»). Практичне застосування такої методології забезпечує рівну точність та представництво результатів вимірювання радіаційних параметрів, що характеризують всю територію, яка контролюється.

Застосовуючи модель радіаційної ємності ландшафту та його компонентів, що знаходяться в зоні впливу АЕС, та розрахунки радіаційного ризику від опромінення людини та наземної біоти, розроблено підхід до визначення величини такого викиду радіонуклідів з АЕС, який забезпечує безпечне існування наземної біоти (екологічне нормування) і людини (гігієнічне нормування).

Розрахунок, виконаний для реального викиду ^{137}Cs із Запорізької АЕС, показав, що екологічно безпечний рівень опромінення організмів біоти (ссавців), які знаходяться на досліджуваній території в зоні спостереження станції, буде забезпечуватися при викиді з АЕС майже на порядок більшому ніж для людини. *Ключові слова:* радіаційний вплив АЕС, гігієнічне та екологічне нормування, радіаційна ємність, ландшафт, ландшафтний компонент, зовнішнє опромінення, радіаційний ризик, екологічно безпечні викиди АЕС.

Application of the radiation capacity model of the landscape and its components for the assessment of the radiation risk of external irradiation of humans and biota and the determination of environmentally safe emissions of NPP. Barbashev S., Burban N.

The article proposes a model of the radiation capacity of the landscape and its components, which differs from the models proposed by other authors in that it takes into account the dimensions and properties of both the landscape and its components. In addition, this model allows you to take into account the scale of migration of radionuclides and their maximum accumulation in them, which is compared with the level of negative impact of pollutants on biotic elements and people inherent in the territory exposed to radiation pollution.

It is shown that, knowing the radiation capacity of a component of the landscape, it is possible to determine the level of maximum accumulation of radionuclides in the components of the natural environment that are in the zone of influence of a nuclear power plant operating in regular mode, as well as to obtain the value of individual radiation risk from external exposure of the population and terrestrial biota, which are in the territory of the NPP monitoring zone.

The assessment of radiation capacity and risk was performed using the data of complex radioecological monitoring of the territories of the NPP location, the methodology of which was developed at the NPP Department of the Odessa Polytechnic Institute (now the National University "Odessa Polytechnic"). The practical application of this methodology ensures equal accuracy and representation of the results of measurement of radiation parameters characterizing the entire monitored territory.

Applying the model of the radiation capacity of the landscape and its components located in the zone of influence of the NPP, and calculations of the radiation risk from the exposure of humans and terrestrial biota, an approach was developed to determine the amount of radionuclide emission from the NPP that ensures the safe existence of terrestrial biota (ecological regulation) and humans (hygienic regulation).

The calculation performed for the real emission of ^{137}Cs from the Zaporizhzhya NPP showed that an ecologically safe level of exposure to biota organisms (mammals) located in the studied territory in the station's monitoring zone will be ensured when the emission from the NPP is almost an order of magnitude greater than for humans. *Key words:* radiation impact of nuclear power plants, hygienic and environmental regulation, radiation capacity, landscape, landscape component, external exposure, radiation risk, ecologically safe emissions of nuclear power plants.

Постановка проблеми. Основна тенденція у взаємовідносинах людини і навколишнього природного середовища на сучасному етапі полягає у створенні умов, які обмежують антропогенний вплив на компоненти як природних, так і штучних, наприклад, аграрних, екосистем з метою підтримки їх сталого функціонування.

Значною мірою це відноситься до ситуації опромінення людини і природного середовища іонізуючої радіацією, джерелами якої є ядерні установки, зокрема АЕС.

До теперішнього часу системи радіаційного захисту людини та навколишнього природного середовища будуються на антропоцентричному принципі, сенс якого полягає в тому, що, якщо від дії іонізуючих випромінювань захищена людина, то в умовах захищеності знаходиться і навколишнє природне середовище (Публікація 60 МКРЗ, 1990 рік) [1].

Слід відзначити, що наслідки впливу радіаційного опромінення на здоров'я людини відносно добре відомі. Це дозволило створити систему радіаційно-гігієнічних нормативів, які спрямовані на забезпечення допустимих рівнів опромінення людей. Наслідки же дії іонізуючої радіації на біоту вивчені не так детально. Тому дослідження, направлені на вироблення чітких заходів щодо охорони екосистем від радіаційного опромінення та створення відповідних екологічних нормативів дозволить наблизити практичну реалізацію рекомендацій Публікації 103 МКРЗ [2] щодо застосування екоцентричного принципу забезпечення радіаційної безпеки навколишнього природного середовища.

Актуальність дослідження. Сучасні дослідження та розрахунки, зокрема наслідків опромінення природного середовища у результаті Чорнобильської аварії, свідчать про те, що існуюча парадигма сучасної екології про відсутність проблем для біоти у разі витримування гігієнічних норм для людини не завжди виконується. В тому числі це пов'язано і з тим, що людина здатна уникати негативних впливів забруднювачів, а біота не може це робити. Хоча існує багато методів і успішних експериментів щодо визначення норм забруднення навколишнього природного середовища, але жодна з теоретичних концепцій на цю тему не може відповісти на всі основні питання, які виникають на практиці. Тому проведення досліджень з узагальнення існуючого досвіду з регламентації впливу радіаційно-небезпечних підприємств, зокрема АЕС, на природне середовище, порівняння та аналіз існуючих концепцій, а також розгляд конкретних методів та досвіду впровадження процедур екологічного нормування є важ-

ливим і актуальним. Такі роботи дадуть можливість практично реалізувати рекомендації МАГАТЄ та МКРЗ щодо захисту природного середовища від негативної дії іонізуючого випромінювання.

Мета дослідження. Запропонувати модель радіаційної ємності ландшафту, величина параметру якої є мірою накопичення радіоактивних забруднень в ньому, а сама модель є системою, що складається з частин, які перебувають у взаємозв'язках один з одним.

Для досягнення цієї мети розроблено підхід до оцінювання величини параметру радіаційної ємності компонента ландшафту території розташування АЕС, який покладено в основу визначення радіаційного ризику зовнішнього опромінення людини та біоти й оцінки екологічно безпечних викидів штатно працюючої АЕС.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Згідно з Конвенцією про ядерну безпеку, яка була підписана Україною у Відні 20 вересня 1994 року і ратифікована Верховною Радою України 17.12.97, й законодавством України про ядерну, радіаційну та екологічну безпеку, найвищим пріоритетом у діяльності державного підприємства «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» (далі – Компанії) є забезпечення безпеки ядерних установок. Компанія бере на себе зобов'язання дотримуватися ряду основоположних принципів забезпечення ядерної, радіаційної та екологічної безпеки, якості, охорони здоров'я, фізичного захисту та охорони праці і, таким чином, сприяти сталому розвитку Компанії.

Дослідження, результати яких наведені у статті, допоможуть досягненню цілей Компанії з дотримання радіаційної та екологічної безпеки.

Аналіз найбільш значних досліджень і публікацій. У 1990 році вийшла Публікація 60 МКРЗ, в якій йдеться про ситуацію запланованого опромінення. Вважається, що саме при цьому забезпечується радіаційний захист людей, а нормативи, необхідні для захисту населення, повинні забезпечити захист біоти і навколишнього природного середовища в цілому.

У Публікації 103 МКРЗ, яка вийшла у 2007 році, вже йдеться про всі можливі ситуації опромінення – заплановане, аварійне, існуюче -, а також про необхідність розгляду широкого діапазону ситуацій опромінення природного середовища незалежно від будь-якого зв'язку з опроміненням людини та про отримання прямих та недвозначних доказів того, що захист природного середовища (біоти), а не тільки людини, буде забезпечений навіть у ситуаціях запланованого опромінення.

В цих ситуаціях для забезпечення достатнього рівня радіаційного захисту докільля пропонується застосовувати концепцію «умовних» (референтних) тварин і рослин. Передбачається, що набір референтних біологічних видів повинен грати в системі радіаційного захисту біоти ту ж роль, що концепція «референтної (стандартної) людини» в системі радіаційного захисту людини.

Таким чином, в останні роки у галузі теоретичної розробки положень стратегії захисту природного середовища намітилося зрушення основної системи поглядів (парадигми) в бік посилення екоцентричних принципів [3,4].

Якщо правильність застосування радіаційно-гігієнічного нормування не викликає сумніву у фахівців і його результати вже давно використовуються на практиці, то підходи до радіаційно-екологічного (далі просто «екологічне») нормування почали обговорюватися відносно недавно.

Існують різні підходи до екологічного нормування радіаційного впливу радіаційно-небезпечних об'єктів, зокрема АЕС, на навколишнє природне середовище. Наприклад, в якості кількісного критерію, за допомогою якого можна здійснювати таке нормування, пропонують визначати концентрацію забруднювача природного середовища, при якому проявляються зміни в життєдіяльності біогеоценозу або у критичних його елементах, тобто порушується стан гомеостазу екосистеми [5], або величину радіаційної смності (радіоємності) компонентів природного середовища, яка виступає як міра небезпечного накопичення радіоактивних забруднень в них [6].

Поняття радіоємності було введено В. І. Корогодіним і А. Л. Агре ще в 1960 році [7] для оцінки розподілу радіоактивних забруднень в непроточній водоймі й визначення міри благополуччя водної біоти. В подальшому, В.І. Корогодін розширив поняття радіоємності на екосистеми і трактував його як кількість радіонуклідів, яку може поглинути екосистема без порушення її функціонування, а кількісна зміна параметрів радіоємності може дати чітке уявлення про якісне «благополуччя» біоценозу в цілому.

Надалі, теорія радіоємності В.І. Корогодіна знайшла відображення в працях Г.Г. Полікарпова [8 – 10]. Також цій проблемі присвячений ряд публікацій Ю.А. Кутлахмедова із співавторами, узагальнених в монографії [11].

Звернімо увагу на те, що теорія радіоємності, яка пропонується авторами вищевказаних робіт, завдання екологічного нормування вирішує шляхом визначення реакції біоти на дозові навантаження на екосистему.

Такий підхід зводить нормування на біогеоценологічному рівні до популяційного рівня. Звідси випливає, що охорона всіх видів біоти забезпечується вибором такого компоненту екосистеми, який піддається найбільшому ризику. Принцип нормування по «най-

більш слабкій ланці» має недоліки, які полягають в тому, що при його використанні ігнорується вплив на всі елементи біоценозу, крім контрольного (референтного), що може призвести до великих помилок при розгляді складних екосистем, функціонування яких підпорядковується принципу емерджентності, тобто наявності у системі особливих властивостей, не властивих її підсистемам. На наш погляд, нормування за окремими – критичними – біотичними елементами розумно використовувати при розгляді аварійної ситуації, коли потрібно зберегти екосистему протягом обмеженого проміжку часу, до моменту ліквідації наслідків аварії.

При штатній же роботі об'єкту (ситуація запланованого опромінення) необхідно гарантувати безпечне існування екосистеми в цілому протягом необмежено тривалого впливу на неї негативних факторів. Це вимагає застосування «інтегральних» критеріїв нормування скидів і викидів забруднюючих речовин в навколишнє середовище, тобто наявності такого нормованого параметру, який би найбільш повно відображав вплив негативного фактору на екосистему або її частину, відносно легко вимірювався і розраховувався. На нашу думку такий параметр може бути однаково застосований як для гігієнічного, так і екологічного нормування.

У роботах [6,11] нормування радіаційного впливу на біоту пропонується реалізувати через радіоємність, яка визначається як гранична кількість радіонуклідів, яка може накопичуватися в біоті без порушення їх основних функцій. При цьому розглядається біота, яка локально розташована в екосистемі.

Слід сказати, що такий підхід фактично являє собою не що інше, як варіант відомих методів коефіцієнтів концентрування або системного аналізу [12], при яких коефіцієнти переходу радіонукліду між ланками екосистеми обумовлюються їх характеристиками в умовах динамічної рівноваги між надходженням і перерозподілом радіонуклідів між ланками. Пропонований підхід до оцінки радіоємності не враховує вплив розмірів екосистеми на кількісну оцінку параметрів опромінення біоти, тобто не враховує такі найважливіші характеристики екосистеми і її компонентів, в першу чергу ландшафтів, як протяжність, спряженість з сусідніми ландшафтами (компонентами ландшафту) і встановлення сталості інтенсивності обміну речовиною між ними. Це означає, що радіоємність в цьому випадку є характеристикою екосистеми або її компонентів, що змінюється в залежності від виду біоти і місця її знаходження.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Автори даної статті вважають, що радіоємність є об'єктивною характеристикою екосистеми або її компонентів, які виступають в якості міри накопичення радіонуклідів в них, яка визначає рівень допустимого радіаційного впливу на біоту й людину

[13,14]. На відміну від радіоємності, яка є функцією концентрації радіоактивного забруднювача у конкретному місці («точці») екосистеми, радіоємність екосистеми в нашому розумінні має враховувати її розміри і дозволяти описувати міграцію радіонукліда від джерела викиду (скидання) в екосистему і між її компонентами.

У даній статті пропонується саме така модель радіаційної ємності ландшафту та його компонентів, де радіаційна ємність ландшафту трактується авторами як **активність радіонуклідів (РН), накопичених за час, протягом якого вміст РН в ландшафті приїде в рівновагу з їх вмістом у сполучених компонентах, що становлять даний ландшафт, при параметрах міграції РН, властивих ландшафтним компонентам** [13-15].

Практично радіаційну ємність ландшафту (R_{kj} , Бк) зручно представляти як суму інтегралів:

$$R_{kj} = \sum_j \int_s K_{ij} q_{ij} dS_i$$

де підсумовування проводиться за усіма j -ми шляхами надходження РН в k -й ландшафтний компонент, а інтегрування береться по усій території (S , m^2), що зазнала впливу i -го джерела; K_{ij} , м/рік – коефіцієнт, який визначає швидкість міграції РН в ландшафтному компоненті; q_{ij} – об'ємна активність РН, що утворилася в ландшафтному компоненті від i -го джерела по j -му шляху, Бк/ m^3 за час, протягом якого настає рівновага.

Наведена вище формула дозволяє спростити розрахунок радіаційної ємності ландшафту, представивши її у вигляді лінійної комбінації радіаційних ємностей окремих його компонентів.

Новизна роботи. Новизна наведеної у статті моделі радіаційної ємності ландшафту та його компонентів полягає в тому, що на відміну від концентрації та визначень радіаційної ємності, запропонованих іншими авторами, радіоємність у нашому розумінні враховує розміри і властивості ландшафтних компонентів і дозволяє врахувати масштаби міграції РН і їх максимальне накопичення в них, яке може бути зіставлено з рівнем негативного впливу забруднювачів на елементи біоценозу (пригнічення, пошкодження, знищення, sukcesія) та людину.

Методологічне та загальнонаукове значення. Отримані у роботі результати базуються на загальноприйнятих рекомендаціях МКРЗ щодо застосування екоцентричного принципу забезпечення радіаційної безпеки навколишнього природного середовища і **методологічно доповнюють** їх в частині підходів до оцінювання рівнів забруднення компонентів природного середовища техногенними радіонуклідами, визначення значень радіаційних ризиків для населення й біоти та інших показників стану природного середовища. Такі доповнення ґрунтуються на методах радіоекологічного моніторингу радіаційної обстановки території, що досліджується, які мають

бути враховані у принципах забезпечення екологічної безпеки в районах розташування ядерних установок, зокрема АЕС.

Виклад основного матеріалу.

1. Обчислення радіаційної ємності компонента ландшафту.

Основним методом обчислення радіаційної ємності є математичне моделювання процесів перерозподілу радіонуклідів, що спирається на експериментальне вивчення міграції РН в ландшафтах і районування території з урахуванням їх ландшафтно-геохімічних особливостей.

В роботі [16] на спрощеному прикладі було показано як можна реалізувати на практиці запропонований підхід до визначення радіаційної ємності ландшафтного компонента території розташування реальної АЕС і як з його допомогою визначити рівень радіаційного впливу АЕС (дозове навантаження) на населення.

Радіаційна ємність визначалася для ділянки, яка знаходиться на відкритій місцевості в зоні спостереження Запорізької АЕС (ЗАЕС) (Рис. 1). Ділянка вибиралася за результатами радіоекологічного моніторингу (РЕМ) ЗАЕС, наведеними у роботі [13, 17].

Базовим методом РЕМ є метод спеціального структурування території зони спостереження АЕС, в основі якого лежить районування, яке полягає в розподілі території на райони, однорідні за ландшафтно-геохімічними характеристиками. Ділянка, яка вивчалася, відноситься до одного з районів (III), який був виділений при районуванні зони спостереження ЗАЕС. Вона складається в основному з чорноземів звичайних малогумусних, з мінімумом рослинного покриву. Тому ландшафтним компонентом, для якого визначалась радіаційна ємність, був вибраний ґрунт.

Розрахунок радіоємності ділянки виконувався відносно радіологічно небезпечного з точки зору впливу на людину і біоту радіонукліда ^{137}Cs , який викидається з АЕС при штатній роботі (ситуація запланованого опромінення).

Для спрощення розрахунків вважалось, що за роки функціонування ЗАЕС (> 30 років) потік ^{137}Cs на ґрунт був приблизно постійний й рівномірний (в дійсності це приблизно виконується), що сприяло встановленню рівноваги між осадженням і поглинанням РН ефективним шаром ґрунту. В такому разі, в середньому за рік в обсязі ґрунтового шару утворюється концентрація (об'ємна активність) ^{137}Cs , яка дорівнює $1,25 \times 10^3$ Бк/ m^3 . При площі району III $1,2 \times 10^8 m^2$, радіоємність (активність) його ґрунтового шару по відношенню до ^{137}Cs , яка буде сформована за рік, складе $\approx 10^9$ Бк, а максимальна радіоємність ґрунтового шару завтовшки $\approx 0,1$ м, в якому в основному накопичується станційний цезій, буде дорівнювати $\approx 10^{10}$ Бк.

В цій же роботі [16] на основі даних про радіоємність ґрунту визначена потужність дози зовнішнього

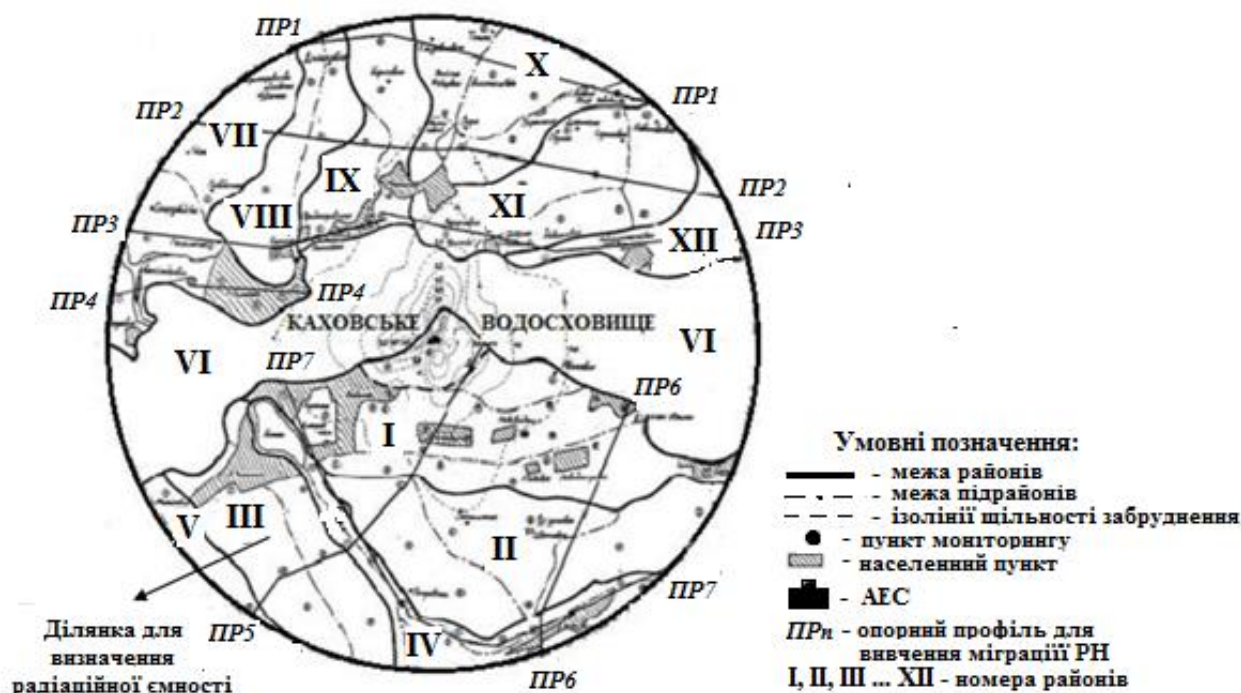


Рис. 1. Картосхема районування зони спостереження Запорізької АЕС та розташування ділянки для визначення радіаційної ємності

опромінення для населення, яке проживає на території вибраної ділянки, за рахунок γ – активності радіонукліда ^{137}Cs , накопиченого за рік в поверхневому шарі ґрунту. Розраховане значення потужності поглиненої дози становило 40,0 мкГр/рік, що збігається із встановленою НРБУ-97 квотою ліміту еквівалентної дози опромінення осіб категорії В за рахунок викидів АЕС (40 мкЗв/рік). **Це означає, що радіаційно-гігієнічний норматив для групи осіб категорії В, яка мешкає в досліджуваному районі зони спостереження ЗАЕС, виконується.**

Якщо узагальнити дані про радіаційну ємність всіх компонентів ландшафтів, які є в зоні спостереження АЕС, то можна визначити безпечний для людини рівень максимального накопичення радіонуклідів на території навколо АЕС, яка працює в штатному режимі, тобто проведення радіаційно-гігієнічного нормування.

2. Визначення радіаційного ризику зовнішнього опромінення людини та біоти.

Знаючи радіаційну ємність ландшафтних компонентів, можна оцінити радіаційний ризик для населення та біоти від радіаційного забруднення території навколо АЕС.

У роботі [16] розраховано індивідуальний радіаційний ризик від зовнішнього опромінення населення, що проживає на території ділянки зони спостереження ЗАЕС, яка вище розглядалася при визначенні радіаційної ємності ландшафтного компоненту (ґрунту). Будемо вважати, що ризик формується за рахунок забруднення ґрунту станційним

^{137}Cs . Скористаємося методикою [18], в якій довічний радіаційний ризик від техногенного опромінення протягом року від зовнішнього опромінення $R_{\text{ext,si}}$, обумовленого радіонуклідом, що міститься у ґрунті, рекомендується визначати за формулою:

$$R_{\text{ext,si}} = r_{\text{ext,si}} \times T_{\text{stay}} \times C_{\text{soil,i}}$$

де $r_{\text{ext,si}}$ – коефіцієнт радіаційного ризику при забрудненні ґрунту і-м радіонуклідом, значення якого наводиться у [15];

T_{stay} – частка часу (з розрахунку на один рік), що проводиться на відкритій місцевості без захисту;

$C_{\text{soil,i}}$ – питома активність і-го радіонукліду у ґрунті, Бк/кг.

Підставляючи у формулу для визначення ризику відповідні значення параметрів ($r_{\text{ext,si}}$ – з таблиці [18], T_{stay} приймаємо рівним 0,3, $C_{\text{soil,i}}$ – беремо з розрахунків радіоємності, маючи на увазі, що це значення питомої активності відноситься до всього ландшафтного компоненту, питома вага чорнозему – 10^3 кг/м^3), отримуємо:

$$R_{\text{ext,si}} = 6,9 \times 10^{-5} \text{ кг / рік} \cdot \text{Бк} \times 0,3 \times 1,25 \text{ Бк / кг} = 2,6 \times 10^{-5} \text{ 1 / рік.}$$

Це значення, отримане на основі моделі радіоємності, визначає індивідуальний радіаційний ризик від зовнішнього опромінення для населення, що проживає на території ділянки, яка розглядається у статті. Воно не перевищує величини індивідуального довічного ризику для населення в умовах нормального експлуатації АЕС, наведеного в НРБУ-97 ($5,0 \times 10^{-5}$)

та практично збігається з величиною ризику від зовнішнього опромінення населення Запорізької області ($1,1 \times 10^{-5}$), розрахованого у роботі [19].

Отже, знаючи радіаційну ємність компонента ландшафту, можливе визначення не тільки рівня максимального накопичення радіонуклідів у компонентах природного середовища, що знаходяться у зоні впливу штатно працюючої АЕС, але і **дає можливість визначення радіаційного ризику для населення**, яке проживає на території навколо радіаційно-небезпечного об'єкту.

Оцінимо **радіаційний ризик від зовнішнього опромінення наземної біоти**, яка знаходиться на території досліджуваної ділянки зони спостереження ЗАЕС. Будемо вважати, що такий ризик також формується за рахунок забруднення ґрунту ^{137}Cs . Величину ризику будемо оцінювати на основі отриманих раніше даних про радіоємність. У ролі представницького об'єкту біоти виберемо гризунів (миші, кроти), які відносяться до ссавців та хребетних тварин.

Відповідно до рекомендацій Публікації 108 МКРЗ [20], радіаційний ризик для біоти оцінюють за формулою:

$$R_j = D_j / RD,$$

де D_j – потужність дози опромінення j -го представницького об'єкту біоти, Гр/добу (в нашому випадку, як і для людини це 40 мкГр/рік – значення, яке одержано за допомогою даних про радіоємність); RD – контрольний рівень екологічно безпечного опромінення організмів біоти, що дорівнює 0,001 Гр/добу для ссавців, хребетних тварин і сосни.

Підставляючи в формулу числові значення для співмножників, отримуємо, що радіаційний ризик наземної біоти від зовнішнього опромінення, обумовленого радіонуклідом ^{137}Cs , що міститься в ґрунті, дорівнює:

$$R_j = \frac{40 \text{ мкГр} / \text{рік}}{0,0001 \text{ Гр} / \text{доб}} = 1,1 \times 10^{-4} \text{ рік}^{-1}$$

Порівнюючи значення радіаційного ризику для біоти із значенням індивідуального радіаційного ризику для людини в умовах нормальної експлуатації АЕС, бачимо що **при однаковому викиді РН величина радіаційного ризику для біоти на порядок більша. Це в даному випадку означає, що людина є більш радіочутливою, ніж досліджувана біота.**

3. Оцінювання екологічно безпечних викидів АЕС.

На основі відомостей про радіаційний ризик людини і біоти, одержаних з допомогою моделі радіаційної ємності ландшафтного компонента, оцінимо величину екологічно безпечних викидів АЕС, тобто таких викидів, які не впливають негативно на життєдіяльність біоти, даного ландшафтного компонента.

Розрахунок екологічно безпечних викидів АЕС для наземної біоти виконаємо на основі припущення

про те, що при штатних викидах, тобто при ситуації запланованого опромінення, відношення радіаційних ризиків від опромінення людини і біоти прямо пропорційні відношенню викидів, які утворюють ці ризики, а вони пропорційні відношенню радіочутливостей людини і біоти.

Таким чином, припускаємо, що:

$$\frac{R_{\text{ext}}}{R_j} \approx \frac{A_{\text{ext}}}{A_j} \propto K_i$$

де: R_{ext} – радіаційний ризик зовнішнього опромінення населення. У нашому випадку $R_{\text{ext}} \approx 10^{-5}$ 1/рік.

R_j – радіаційний ризик зовнішнього опромінення біоти. У нашому випадку $R_j \approx 10^{-4}$ 1/рік.

A_j – річний викид ^{137}Cs з АЕС, який спричиняє небезпеку (ризик) біоті.

A_{ext} – річний викид ^{137}Cs з АЕС, що спричиняє ризик людині, який відповідає R_{ext} . У нашому випадку $A_{\text{ext}} \approx 10^7$ Бк/рік, тобто дорівнює реальному середньому викиду ^{137}Cs із ЗАЕС за 2008-2018 роки [21].

K_i – коефіцієнт, який показує на скільки радіочутливість людини відрізняється від радіочутливості вибраного виду біоти при опроміненні i -м радіонуклідом.

Звідси:

$$\frac{10^{-5} \text{ 1} / \text{рік}}{10^{-4} \text{ 1} / \text{рік}} \approx \frac{10^7 \text{ Бк} / \text{рік}}{A_j} \rightarrow A_j \approx 10^8 \text{ Бк} / \text{рік}$$

Це означає, що річний викид ^{137}Cs з АЕС, який буде спричиняти ризик біоті (рівень екологічно безпечного опромінення організмів біоти дорівнює 0,001 Гр/добу для ссавців) приблизно на порядок перевищує рівень реальних викидів, які спричиняють ризик для людини.

Якщо подальші дослідження для різних видів біоти, різних радіонуклідів, різних компонентів ландшафту, опромінення як зовнішнього, так і внутрішнього, підтвердять отриманий результат, то це може стати ще одним доказом того, що **при ситуації запланованого опромінення** (штатна робота АЕС) антропоцентричний принцип протирадіаційного захисту може бути застосований також й для захисту біоти, тобто свідчити про відсутність підстав для відмови від гігієнічного принципу радіаційного захисту на користь екологічного. Але на нашу думку такий висновок не безперечний для ситуацій аварійного та існуючого опромінення і потребує підтвердження.

Наведені у статті підходи до визначення радіаційної ємності ландшафтного компонента, радіаційного ризику для людини і біоти, а також екологічно безпечного викиду АЕС, та отримані результати носять попередній, ілюстративний характер, але, тим не менш, наводяться тут, щоб продемонструвати один з можливих шляхів практичної реалізації рекомендацій Публікації 103 МКРЗ щодо застосування екоцентричного принципу забезпечення радіаційної безпеки навколишнього природного середовища.

Головні висновки:

1. Запропоновано модель радіаційної ємності ландшафту та його компонентів, яка відрізняється від методу визначення концентрацій та моделей радіаційної ємності інших авторів, тим, що вона враховує розміри і властивості як ландшафту, так і його компонентів й дозволяє врахувати масштаби міграції радіонуклідів між компонентами, які є складовими ландшафту в цілому.

2. Показано, що, знаючи радіаційну ємність ландшафтних компонентів, можна визначити рівень максимального накопичення радіонуклідів у компонентах екосистеми, яка перебуває у зоні впливу АЕС, і, зіставляючи його з існуючими нормативами радіаційного впливу на ці компоненти, зробити висновок про необхідність застосування тих чи інших заходів протирадіаційного захисту.

3. Інформація про радіаційну ємність також дозволяє отримувати значення радіаційного ризику від зовнішнього опромінення для населення та наземної біоти, що знаходяться на території зони спостереження АЕС.

4. Оцінювати радіоємність та ризик пропонується на основі даних комплексного радіоекологічного моніторингу території розташування ядерних установок, зокрема АЕС, методологія якого розроблена на кафедрі АЕС Одеського політехнічного інституту (нині Національний університет «Одеська політехніка»). Практичне застосування такої методології

забезпечує рівну точність та представництво результатів вимірювання радіаційних параметрів, що характеризують всю контрольовану територію.

5. Застосовуючи модель радіаційної ємності компонентів ландшафту, що знаходяться в зоні впливу АЕС, та дані розрахунку радіаційного ризику від опромінення людини та наземної біоти, розроблено підхід до визначення викиду радіонуклідів з АЕС, який забезпечує безпечне існування наземної біоти (екологічне нормування) і людини (гігієнічне нормування).

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані у роботі результати можуть бути корисними при розробці спеціальної методології, яка визначатиме систему принципів та способів організації практичної діяльності, спрямованої на захист екосистем від дії іонізуючої радіації, зокрема, за допомогою екологічного нормування, структури, логічну організацію, методи та засоби такої діяльності.

Слід додати, що оцінювання рівнів забруднення компонентів природного середовища техногенними радіонуклідами, визначення значень радіаційних ризиків для населення та біоти та інших показників стану компонентів природного середовища мають виконуватися на основі даних радіоекологічного моніторингу радіаційної обстановки території, що вивчається, методи якого повинні обов'язково входити до створеної методології.

Література

1. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Пределы годового поступления радионуклидов в организм работающих, основанные на рекомендациях 1990 г. Публикации 60 МКРЗ, Ч I. 61 МКРЗ. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1994. 192 с.
2. Рекомендации Международной комиссии по радиационной защите 2007 года. Публикация 103 МКРЗ. Пер с англ. Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 344 с.
3. Алексахин Р.М., Фесенко С.В. Радиационная защита окружающей среды: антропоцентрический и эоцентрический принципы. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2004. Т. 44. № 1. С. 93–103.
4. Гудков И.Н., Майдебуря О.П. Антропоцентрический, эоцентрический и эксцентрический подходы к радиационной и техногенной безопасности человека и окружающей среды. *Техногенна безпека: Наукові праці. Серія Техногенна безпека*. 2010. Том 139. № 126. С. 4–9.
5. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь – справочник. М.: Мысль, 1990. С. 306 – 307.
6. Кутлахмедов Ю.А., Матвеева И.В., Петрусенко В.П. Корогодина В.И. [и др.] Проблемы экологического нормирования и радиационная безопасность биоты экосистем. *Техногенна безпека*. 2009. Т.116. Вып.103. С. 29–33.
7. Агре А.Л., Корогодина В.И. Распределение радиоактивных загрязнений в непроточном водоеме. *Журнал медицинской радиологии*. 1960. Т. 5. № 1. С. 67–73.
8. Поликарпов Г. Г. Радиоэкология морских организмов. Накопление и биологическое действие радиоактивных веществ. М.: Атомиздат, 1964. 295 с.
9. Поликарпов Г.Г. Экологические основы охраны гидросферы от антропогенных воздействий. *Гидробиологический журнал*. 1981. Т. 17. Вып. 6. С. 3–10.
10. Поликарпов Г. Г., Цыгулина В.Г. Гидробионты в зоне влияния аварии на Кыштыме и в Чернобыле. *Радиационная биология и радиоэкология*. 1995. Т. 35. № 4. С. 536–548.
11. Кутлахмедов Ю.А. Дорога к теоретической радиоэкологии. К.: Фитосоцицентр, 2015. 360 с.
12. Публикация № 29 МКРЗ. Выброс радионуклидов в окружающую среду. Расчет доз облучения человека. М., Атомиздат, 1980. 96 с.
13. Барбашев С.В. Система комплексного радиоэкологического мониторинга районов расположения АЭС Украины: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.14. Одесса, 2009. 394 с.
14. Барбашев С.В., Кононович А.Л., Скотнюкова О.Г., Фесенко С.В. Радиационная емкость почвы. *Радиационная и экологическая безопасность предприятий ядерного топливного цикла*. Одесса: УкрЯО, 1995. Вып. 1. С. 72 – 80.
15. Барбашев С.В., Гладун Н.С. Радіаційна ємність екосистем та екологічне нормування радіаційного впливу АЕС. *Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку*: збірник

матеріалів Третьої Міжнародної науково-практичної конференції, 22-23 жовтня 2020, м. Херсон, Україна – Херсон :«ОЛДІ-ПЛЮС», 2020. С. 41–44.

16. Барбашев С.В., Гладун Н.С. Оценка радиационного риска внешнего облучения населения на основе данных о радиоёмкости почвенного слоя, загрязненного радионуклидами. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: збірник наукових статей XVI Міжнародної науково-практичної конференції, 14-18 вересня 2020 р.* Харків: ПП «Стиль-Іздат», 2020. С. 29–35.
17. Барбашев С.В., Пристер Б.С. Оценка воздействия Запорожской АЭС на окружающую среду на основе данных комплексного радиоэкологического мониторинга. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.* 2017. Т. XXVIII. № 6. С. 52 – 74.
18. Рекомендации Р 52.18.787-2013. Методика оценки радиационных рисков на основе данных мониторинга радиационной обстановки. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2014. 108 с.
19. Костенецький М.І.,Севальнев А.І.,Куцак А.В. Оцінка ризику наслідків опромінення для населення Запорізької області. *Вісник проблем біології і медицини.* 2018. Вип.4. том 1(146) С. 40 –44.
20. ICRP Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. Ann. ICRP. 2009. V. 38. No. 4. P. 1–242.
21. Звіт з періодичної переоцінки безпеки енергоблоку № 5 ВП ЗАЕС. Фактор безпеки № 14. Вплив експлуатації на навколишнє середовище. Київ, Энергодар: ДП НАЕК «Енергоатом», ВП «Запорізька АЕС», 2019. С. 37 –38.