

<https://doi.org/10.15407/10.15407/geotech2021.34.005>

УДК УДК 51:550.47:574.4:614.7:608:631.438:632.118.3:636

Копиленко О.Л., Носовський А.В., Долін В.В.

акад. НАН України **Копиленко О.Л.**, д.ю.н., проф., Народний депутат України, Kopylenko@nas.gov.ua

акад. НАН України **Носовський А.В.**, д.т.н., проф. Інститут проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України», <https://orcid.org/0000-0002-2594-3780>, anosov@ispnpp.kiev.ua

Долін В.В., д.г.н., проф., Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», vdolin@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6174-2962

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ПОДОЛАННЯ НАСЛІДКІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ (ЗАМІСТЬ ПЕРЕДМОВИ)

У статті критично розглянуто стан вирішення ключових проблем, проаналізовано причини низьких темпів подолання наслідків Чорнобильської катастрофи, пов'язаних з неефективністю державного управління. За 35 років, що минули після аварії на IV енергоблоці ЧАЕС, не розроблено державної стратегії поступової, крок за кроком, ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи, критеріїв, за якими її можна вважати завершеною. У зв'язку зі зміною структури радіоактивного забруднення території, накопиченням нових знань у галузі радіаційної медицини, сільськогосподарської радіології, радіобіології, радіогеохімії, радіоекології, нагально необхідно переглянути концептуальні положення чорнобильських законів та програмних документів, котрі здебільшого базуються на даних радіоекологічного обстеження 30-річної давнини. Серед найбільш актуальних невирішених проблем радіаційної безпеки – технологічні основи поводження з паливовмісними матеріалами у процесі розбирання нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», обсяг яких перевищує 15 т (за UO₂) загальною активністю до 4,8×10¹⁷ Бк. Недосконалість системи радіогідроекологічного моніторингу в зоні впливу Об'єкта «Укриття» і третього енергоблоку ЧАЕС, пунктів тимчасової локалізації та захоронення радіоактивних відходів у Чорнобильській зоні відчуження, зокрема, внаслідок техногенно спричинених змін гідрологічного режиму, веде до недостатньо достовірних оцінок та прогнозу радіоактивного забруднення підземних джерел питного водопостачання. Одна з найбільш актуальних сучасних радіоекологічних проблем – накопичення у навколишньому природному середовищі Америцію-241 та його дозотвірного впливу. Наразі вміст цього радіонукліду за межами аварійного енергоблоку майже зрівнявся зі ⁹⁰Sr і продовжуватиме збільшуватися до середини нинішнього століття. Водночас його радіобіологічна ефективність значно вища за гама- і бета-випромінювання дозотвірних ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr. Стратегія подолання наслідків Чорнобильської катастрофи повинна носити комплексний характер і бути спрямованою на паралельне вирішення гуманітарних, екологічних, технологічних, міжнародних і політичних питань.

Ключові слова: Чорнобильська катастрофа, стратегія подолання, Об'єкт «Укриття», радіоактивне забруднення, лавоподібні паливовмісні матеріали, радіоекологічні проблеми, радіогідроекологічний моніторинг, пункти захоронення і тимчасового зберігання радіоактивних відходів, Америцій-241.

Забезпечення екологічної безпеки і підтримання екологічної рівноваги на території України, подолання наслідків Чорнобильської катастрофи – катастрофи планетарного масштабу, збереження генофонду Українського народу є обов'язком держави

Стаття 16 Конституції України

Минуло тридцять п'ять років від 26 квітня 1986 р., коли на четвертому енергоблоці Чорнобильської атомної станції, розташованій менш як за 100 км від столиці Української РСР у мальовничих верхів'ях р. Прип'ять, неподалік від нинішніх кордонів Білорусі, Росії та України сталася найбільша аварія в історії атомної енергетики. Її головними причинами сьогодні називають проектні та

конструкторські недоліки, а також низький рівень культури безпеки оперативного персоналу станції. Унаслідок руйнування активної зони реактора протягом 10 діб до 6 травня 1986 року відбувався викид у 2-кілометровий шар атмосфери радіоактивних газів, аерозолів і частинок палива. Загальноприйнята на цей час оцінка викиду радіоактивних речовин становить близько 1,4×10¹⁹ Бк, у тому числі найбільш небезпечних з медико-біологічних позицій ¹³¹I – 1,8×10¹⁸, ¹³⁷Cs – 8,5×10¹⁶, ⁹⁰Sr – 1×10¹⁶, ізотопів плутонію – 3×10¹⁵ [1] (табл. 1). Рівень забруднення ¹³⁷Cs на території Європи площею більше 200 000 квадратних кілометрів становив понад 37 кБк/кв. м. Значна її частина розташована у трьох найбільш постраждалих країнах — Білорусі, Росії та Україні.

Унаслідок Чорнобильської катастрофи постраждало понад 5 мільйонів людей, забруднено радіоактивними нуклідами близько 5 тисяч населених пунктів Республіки Білорусь, України та Російської Федерації. З них майже половина - в

Україні - 2218 селищ та міст із населенням приблизно 2,4 млн. чол. Крім України, Республіки Білорусь та Російської Федерації вплив Чорнобильської катастрофи відчули на собі Швеція, Норвегія, Польща, Великобританія та інші країни.

Таблиця 1. Основні дозотвірні радіонукліди в реакторі IV енергоблоку ЧАЕС та обсяги їх викиду в навколишнє середовище за даними МАГАТЕ [1]

Table 1. The main dose-forming radionuclides in the ChNPP Unit IV reactor and assessment of the environmental release (IAEA [1])

Радіонуклід	Період напіврозпаду	Накопичена в реакторі активність, Бк	Викид активності, Бк*	Вміст у довкіллі станом на 26.04.2021
⁹⁰ Sr	28,80 років	$2,3 \times 10^{17}$	$1,00 \times 10^{16}$	$4,31 \times 10^{15}$
¹³¹ I	8,02 діб	$3,1 \times 10^{18}$	$1,76 \times 10^{18}$	розпався
¹³⁷ Cs	30,17 років	$2,6 \times 10^{17}$	$8,50 \times 10^{16}$	$1,51 \times 10^{16}$
²³⁸ Pu	87,71 років	$1,3 \times 10^{15}$	$1,50 \times 10^{13}$	$1,14 \times 10^{13}$
²³⁹ Pu	24 113 років	$9,2 \times 10^{14}$	$1,30 \times 10^{13}$	$1,30 \times 10^{13}$
²⁴⁰ Pu	6564 років	$1,5 \times 10^{15}$	$1,80 \times 10^{13}$	$1,79 \times 10^{13}$
²⁴¹ Pu	14,4 років	$1,8 \times 10^{17}$	$2,60 \times 10^{15}$	$4,82 \times 10^{14}$
²⁴¹ Am	432,6 років	$1,6 \times 10^{14}$	Імовірно, $4,80 \times 10^{12}$	$2,00 \times 10^{15}$

* - похибка оцінки 50 %.

Події тієї ночі, коли нічна зміна на четвертому енергоблоці Чорнобильської АЕС завершувала планові випробування вільного вибігу турбіни після зупинки реактора, сьогодні розписані по секундах. Наслідки цих секунд розділили час і простір на «до» і «після», утворивши в центрі Європи відчужену Зону площею понад 2500 квадратних кілометрів на раніше густонаселених територіях, і, без перебільшення, змінили світ.

Двадцять століття увійшло в історію цивілізації як століття найбільш кривавих війн, природних і техногенних катастроф. Утім, наслідки Другої світової війни людство практично здолало протягом 15 років. Про подолання наслідків Чорнобильської катастрофи ми не ведемо мову навіть через три з половиною десятиліття. Унаслідок відсутності державної стратегії поступової, крок за кроком, ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи, критеріїв, за якими її можна вважати завершеною, у населення й у владних структурах створився стереотип неможливості подолання наслідків катастрофи. Натомість в офіційних політичних та урядових документах прижився хибний термін «мінімізація», який застосовується донині.

Чорнобильська АЕС із винуватця і причини Чорнобильської катастрофи перетворилася чи не в найбільшу її жертву. Надмірна увага з боку уряду і міжнародної спільноти саме до припинення експлуатації ЧАЕС і перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему створили враження, що саме вирішення цих проблем має найважливіше значення для ліквідації наслідків

Чорнобильської катастрофи. Проте за минулі 35 років не розроблено однозначного науково і технічно обґрунтованого рішення щодо поводження з паливовмісними матеріалами та високоактивними відходами об'єкта «Укриття». Разом із цим відсутність в Україні геологічного сховища радіоактивних відходів дає підстави для сумнівів, що і в наступні 35 років ця проблема буде вирішена.

Проблема «чорнобильських лав»

Унаслідок аварії всередині IV енергоблоку Чорнобильської АЕС у 1986 р. утворилося не менше 15 т (за UO₂) лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ) загальною активністю (за оцінкою на 2010 р.) близько $4,8 \times 10^{17}$ Бк [2]. Прийнято вважати, що ЛПВМ є результатом взаємодії оксиду урану таблеток ядерного палива (що містять також продукти ділення і активації) з цирконієвим сплавом оболонки твелів і силікатами, що входять до складу конструкційних матеріалів реактора (серпентинітової засипки, піску, бетону тощо) [3,4]. Унаслідок хімічно (окиснення) та радіаційно спричиненої деструкції ЛПВМ відбувається їх руйнування з утворенням дрібнодисперсного радіоактивного пилу, що є головним чинником екологічної небезпеки в процесі монтажу нестабільних конструкцій Об'єкта «Укриття». Найбільш небезпечними елементами мікроструктури ЛПВМ є включення оксиду урану та уранвміщуючих фаз. Саме в цих включеннях проходить процес окиснення оксиду урану, що призводить до збільшення їх об'єму, зародження тріщин та руйнування ЛПВМ.

Схематично мікроструктуру зразка коричневої кераміки ЛПВМ наведено на рис. 1. Включення оксидів урану представлені оксидом урану $UO_{2,34}$. Також ідентифікуються включення оксиду цирконію, які мають кубічну та тетрагональну структуру. Кристалічні фази оксидів цирконію є результатом кристалізації (принаймні частини) аморфної цирконій-уран-кисневої фази $(U,Zr)O_x$ після аварії. Присутні включення силікату цирконію, відомі як «чорнобиліт» $(Zr,U)SiO_4$. Ураніт силікат гідрат калію-натрію $(K,Na)_2(UO_2)_2(Si_2O_5)_3 \cdot 4H_2O$ (мінерал віксіт) (wecksite), який нещодавно виявлено, найімовірніше перебуває в зоні контакту оксиду урану UO_x та силікатної склофази по поверхні включень оксиду урану. Він сформувався як результат взаємодії оксиду урану із включень та оксидів кремнію, натрію і калію склофази ЛПВМ і води. Силікатна склофаза ЛПВМ містить кілька раніше невідомих фаз оксиду кремнію SiO_2 : орторомбічну, тригональну і, можливо, тетрагональну. Також в силікатній склофазі знаходяться силікат алюмінію Al_2SiO_5 і, можливо, силікат кальцію Ca_2SiO_4 . Всі фази оксиду кремнію та силікати сформувалися частково в результаті кристалізації багатоконпонентного силікатного розплаву при його охолодженні під час аварії та частково в результаті кристалізації склофази впродовж тривалого часу після аварії.

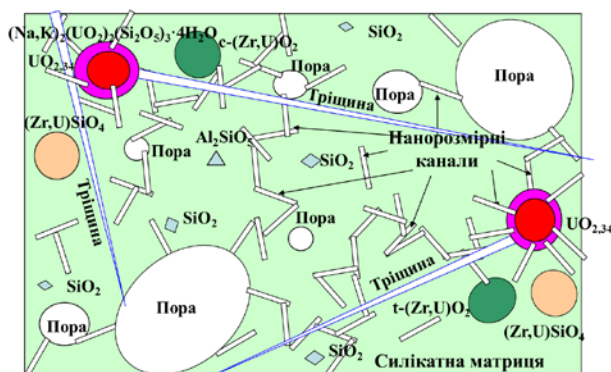


Рис. 1. Модель структури коричневої кераміки ЛПВМ (автори С.В. Габелков, І.В. Жиганюк (ІПБ АЕС НАН України))

Fig. 1. Structure model of brown ceramics from Lava-like Fuel Containing Materials (authors SV Gabelkov, IV Zhiganyuk, Institute for Safety Problems of NPP of NAS of Ukraine)

Поровий простір коричневої кераміки має такі складові: великі та малі газові пори, тріщини і нанорозмірні порові канали (рис. 1). Нанорозмірні порові канали пронизують склофазу і всі кристалічні включення коричневої кераміки. Вони з'єднують газові пори та тріщини між собою і з

зовнішнім середовищем. Включення оксидів урану є найбільш проблемними елементами мікроструктури ЛПВМ. Саме в них проходить низка фізичних та хімічних процесів: проникнення кисню повітря в ЛПВМ до включень оксидів урану UO_x по відкритих нанорозмірних порових каналах, окиснення киснем повітря оксиду урану UO_2 у включеннях і формування тріщин в ЛПВМ за рахунок збільшення об'єму включень оксидів урану UO_x , які підтверджено незворотнім збільшенням об'єму більш ніж на 0,5% коричневої кераміки ЛПВМ при повільному ізотермічному відпалі за $500^\circ C$ протягом 54 годин (7 циклів) і зменшенням механічних характеристик із наступним руйнуванням зразків на дрібні фрагменти.

Результати досліджень свідчать про те, що включення оксиду урану $UO_{2,34}$ в коричневої кераміці знаходяться в стисненому стані. Окиснення оксиду урану UO_x у включеннях проходило коли склофаза була міцною, не пластичною. Збільшення об'єму включень оксиду урану UO_x при окисненні послужило причиною формування тріщин.

Зразки чорної кераміки ЛПВМ досліджено методом електронної мікроскопії [5]. На рис. 2 наведено фото зерен чорної кераміки, серед яких відмічено зерно оксиду урану з розмірами 3 - 10 мкм (поз. 2.14). Елементний склад зерна оксиду урану наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Результати мікрзондового аналізу зерен ЛПВМ (чорна кераміка), ваг. %

Table 2. The data of microprobe analysis of black ceramics grains from Lava-like Fuel Containing Materials, wt. %

Елемент	Фіг.2 Поз. 2.14	Фіг.2 Поз. 2.15
O	19.65	42.10
Na	0.00	0.00
Mg	0.00	1.83
Al	0.40	4.06
Si	0.00	34.34
P	0.00	0.00
S	0.00	0.00
K	0.00	2.29
Ca	0.00	8.54
Fe	0.00	1.05
Ni	0.00	0.00
Zr	0.00	0.00
U	79.94	5.80
Всього	100.00	100.00

З даних табл. 2 видно, що зерно складається з кисню, урану та алюмінію. Враховуючи малий вміст алюмінію, можна вважати, що зерно на поз. 2.14 (рис. 2) є оксидом урану. Елементний склад великого зерна з розмірами 40 - 50 мкм (поз. 2.15, рис. 2) відповідає силікатному склу, яке окрім магнію,

алюмінію, калію, кальцію та заліза містить ще й уран. Отже найбільш проблемними елементами структури ЛПВМ є включення оксидів урану, які виступають осередками деструкції та диспергування високоактивних радіоактивних відходів всередині Об'єкта «Укриття».

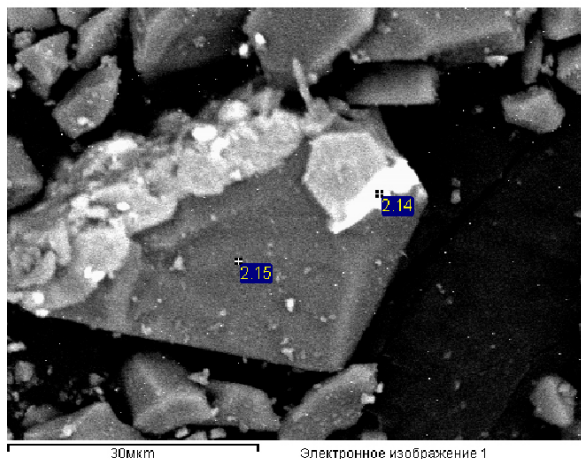


Рис. 2. Електронномікроскопічний знімок зразка коричневої кераміки

Fig. 2. SEM image of brown ceramics sample

Протягом тридцяти п'яти років існування Об'єкта «Укриття» не було запропоновано технологію поводження з цими матеріалами, яка б забезпечила надійний захист навколишнього середовища від небезпечних радіоактивних речовин. Досі не розроблено методичних і технологічних підходів для вирішення цієї проблеми. Водночас результати проведених досліджень свідчать, що після встановлення Нового безпечного конфайнменту (НБК) істотно змінилися волого-температурні умови перебування ядерно небезпечних скупчень в аварійному енергоблоці, що сприяло поступовому зростанню щільності потоку нейтронів. Необхідно провести додаткові дослідження ядерно небезпечних скупчень, переоцінку ефективності системи контролю ядерної безпеки, а також розробити заходи щодо превентивного придушення параметрів критичності скупчення ядерно небезпечних матеріалів, що діляться. Час, умови середовища й особливості фізико-хімічних характеристик паливовмісних матеріалів істотно змінили властивості цих небезпечних матеріалів, що призвело, зокрема, до їх диспергування, утворення та накопичення дрібнодисперсних пилоподібних часточок з високою радіоактивністю.

Потребують оновлення «чорнобильські» закони/ Для сучасного покоління найбільш працездатних і досвідчених 30-40-річних людей Чорнобильська катастрофа є явищем майже

доісторичним. Хоча очевидно, що саме на них, а, можливо, й на наступні покоління, на порушення основних гуманітарних принципів, перекладено вантаж і відповідальність за подолання її наслідків.

На жаль, інженерно-технологічні проблеми зменшення рівня радіоактивного забруднення за межами промислового майданчика ЧАЕС, які визначають тривалість вирішення гуманітарних, соціальних та екологічних проблем, відсунуто на другий план. Навіть реабілітація зони відчуження, зони безумовного (обов'язкового) відселення і зони гарантованого добровільного відселення перестала бути пріоритетом держави. «Мінімізація» наслідків Чорнобильської катастрофи впродовж останніх 30 років полягала передусім у мінімізації фінансування наукового супроводу, що призвело до впровадження низки науково необґрунтованих інженерно-технічних проектів та заходів, які значною мірою виявилися неефективними, а деякі завдали шкоди навколишньому середовищу.

Вирішення соціальних проблем було зведено до надання грошових компенсацій, які були розпорошені на 3 млн. населення і тому не сприяли проведенню ефективної профілактики захворювань та реабілітації потерпілих від аварії. Досі не встановлено конкретні науково обґрунтовані критерії надання компенсацій та розмірів грошових виплат.

У законодавчій базі 30-літньої давнини жодним чином не враховуються новітні наукові досягнення у галузі радіаційної медицини, сільськогосподарської радіології, радіобіології, радіоекології, радіогеохімії. Картування щільності забруднення радіонуклідами ґрунтів виконано у перші роки після катастрофи до 1991 р. за обмеженою кількістю даних. Досі використовують розрахункові, змодельовані величини. Стоїть нагальна потреба в отриманні сучасних реально вимірних величин.

Протягом 30 років після прийняття Закону «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи» відбулася кардинальна зміна структури радіоактивного забруднення території унаслідок фізичного розпаду дозотвірних радіонуклідів (йоду-131, ізоотопів ніобію, цирконію, церію, рутенію, цезію, стронцію, плутонію-241) та накопичення дочірніх ізоотопів (америцію-241). На основі прямих вимірювань лічильником випромінювання людини (ЛВЛ) за цей час створено статистично достовірні бази даних дозових навантажень на населення забруднених регіонів України, виконано їх верифікацію та оцінку на цій основі достовірності визначення паспортних доз

опромінення. Усе це свідчить про необхідність зміни критеріїв зонування території, перерозподілу та спрямування фінансових потоків на відродження радіоактивно забруднених в минулому земель та реалізації заходів щодо радіаційного захисту населення територій, рівні забруднення яких досі становлять небезпеку життєдіяльності.

Сховища радіоактивних відходів – пролонговане джерело забруднення підземних вод/ У пунктах захоронення та тимчасової локалізації в Чорнобильській зоні відчуження зосереджено понад 2 млн. м³ радіоактивних відходів (РАВ). Більшість чорнобильських РАВ зберігаються в умовах, що не відповідають вимогам сучасних норм радіаційного захисту [2]. Відсутність (недосконалість) системи інженерних бар'єрів веде до періодичного підтоплення тіла РАВ, що супроводжується винесенням радіоактивності абіогенним та біогенним шляхом. Разом із тим існуюча система радіогідроекологічного моніторингу (ведення якої фінансується за залишковим принципом) потребує істотного корегування. Це пов'язано з низкою техногенно спричиненої (унаслідок впровадження інженерно-геологічних рішень) зміни шляхів руху підземних вод до зони розвантаження.

За природними умовами Централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива (ЦСВЯП) і пункт захоронення радіоактивних відходів (ПЗРВ) «Буряківка» розташовані на території, де шар кийвського мергелю розмитий. Цю область візуалізовано на рис. 3 у вигляді заштрихованої ділянки. Змодельована фахівцями Інституту проблем безпеки АЕС НАН України траєкторія руху радіоактивно забруднених вод протягом 70-90 років досягає бучацького водоносного горизонту та поширюватиметься по ньому в латеральному напрямку (рис. 4). На відміну від майданчику ЦСВЯП, де виконано обґрунтування мережі спостережних свердловин радіогідроекологічного моніторингу, розташування спостережних свердловин на майданчику ПЗРВ «Буряківка» не дозволяє кількісно оцінити виток радіоактивного забруднення безпосередньо з обводнених траншей сховища. Свердловин, пробурених на бучацький горизонт, що використовується для питного водопостачання, немає взагалі.

Після виведення водоймища – охолоджувача із експлуатації, рух підземних вод під ділянкою розміщення ПЗРВ «Підлісний» направлений на північний схід в сторону озера Азбучин (рис. 5).

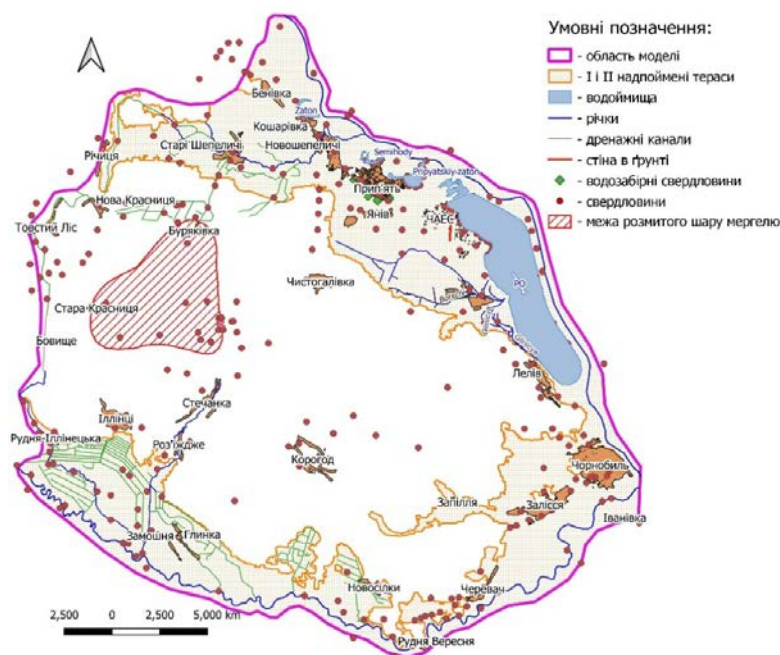


Рис. 3. Природні та техногенні умови ближньої зони Чорнобильської зони відчуження (просторова візуалізація даних М.І. Панасюка та Н.В. Сосонної (ІПБ АЕС НАН України).

Fig. 3. Natural and man-made conditions in the near zone of the Chernobyl Exclusion Zone (spatial data visualization by MI Panasyuk and NV Sosonna, Institute for Safety Problems of NPP of NAS of Ukraine).

Нижче за потоком підземних вод від модулів захоронення радіоактивних відходів спостережні свердловини відсутні. Вміст радіонуклідів у підземних водах контролюється свердловинами, що розташовано на периферії імовірного потоку, та становить (за даними ДСП «Екоцентр») 300 – 1900 Бк/м³ ⁹⁰Sr та 30 – 310 Бк/м³ ¹³⁷Cs. У належному обсязі радіогідроекологічний моніторинг у

районі Об'єкта «Укриття» проводився з 1996 по 2017 рр. По тому через брак коштів спостереження виконувались не регулярно по окремим свердловинам.

Із 30 спостережних свердловин, що були обладнані на промайданчику Нового безпечного конфайнменту – об'єкта «Укриття» (НБК-ОУ), наразі регулярно спостерігаються лише 6, у яких

відповідними службами ДСП ЧАЕС визначаються концентрації ^{137}Cs та ^{90}Sr . В останні декілька років по окремим свердловинам, що розташовані нижче за потоком ґрунтових вод від об'єкта «Укриття», спостерігається значне, в 200 - 500 разів, зростання об'ємних активностей ^{90}Sr до 700 - 2100 КБк/м³ (рис.

б), урану та ТУЕ. Імовірно, що це може бути пов'язано з надходженням радіоактивності з Об'єкту «Укриття». Проте управлінські рішення щодо захисту підземних вод не розробляються і не можуть бути розроблені через відсутність повноцінних моніторингових досліджень.

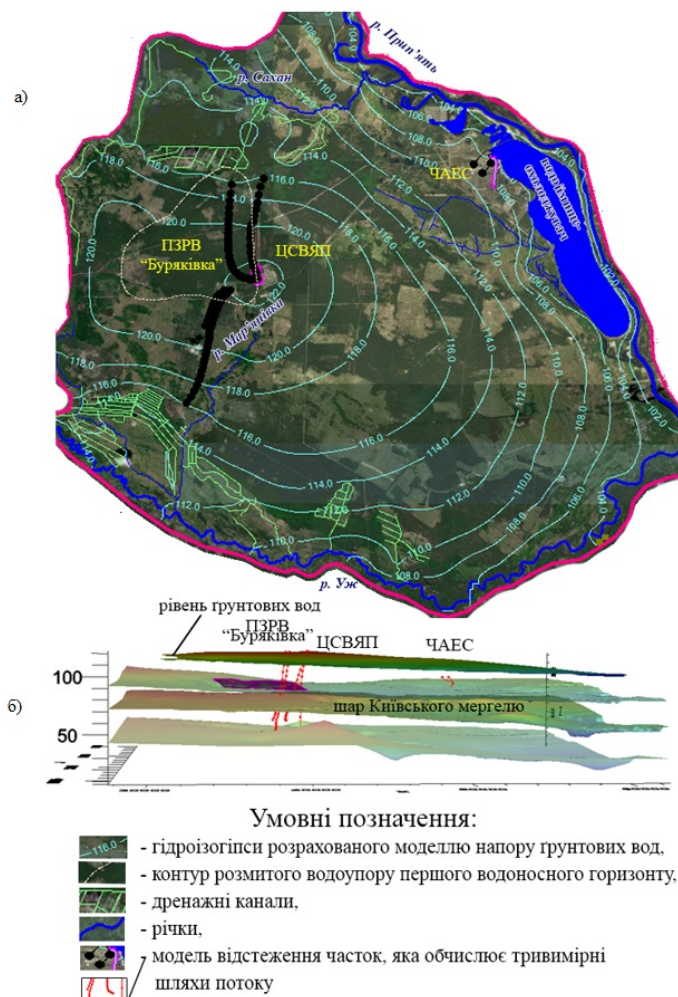


Рис. 4. Вигляд прогнозних шляхів поширення радіонуклідів потоком ґрунтових вод у 2-вимірному (а) та 3-вимірному (б) зображеннях. Автори моделі М.І. Панасюк та Н.В. Сосонна (ІПБ АЕС НАН України).

Fig. 4. Predicted pathways of radionuclide flow with groundwater in 2-dimensional (a) and 3-dimensional (b) images. The authors of the model MI Panasyuk and NV Sosonna (Institute for Safety Problems of NPP of NAS of Ukraine).



Рис. 5. Напрямок поширення радіоактивного забруднення підземних вод від ПЗРО «Підлісний» (показано червоними стрілками). Автори моделі М.І. Панасюк та Н.В. Сосонна (ІПБ АЕС НАН України)

Fig. 5. The direction of groundwater radioactive contamination migration from "Pidlisny" radioactive waste disposal (shown by red arrows). The authors of the model MI Panasyuk and NV Sosonna (Institute for Safety Problems of NPP of NAS of Ukraine)

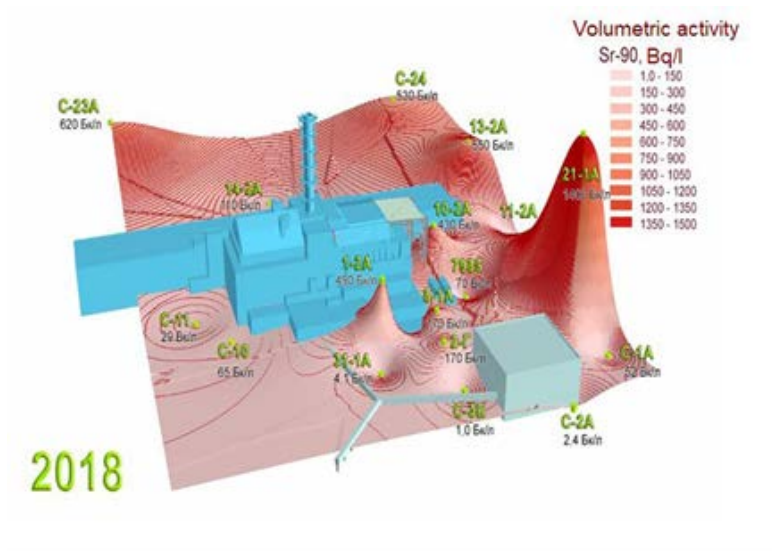


Рис. 6. Просторова візуалізація рівнів забруднення підземних вод ^{90}Sr у межах промайданчика НБК – ОУ та в районі 3-го блоку ЧАЕС у 2018 р. Автори моделі М.І. Панасюк та Н.В. Сосонна (ІПБ АЕС НАН України)

Fig. 6. Spatial visualization of groundwater pollution with ^{90}Sr within the industrial site of “Shelter” object and 3rd unit of the Chernobyl NPP (2018). The authors of the model MI Panasyuk and NV Sosonna (Institute for Safety Problems of NPP of NAS of Ukraine)

«Америцієва» проблема

Серед дозотвірних радіонуклідів набуває особливої ваги Америцій-241 – єдиний з «чорнобильських» радіонуклідів, активність котрого збільшується з часом. Америцій-241 (період напіврозпаду 433 роки) так само, як і цезій-137, є виключно техногенним ізотопом, що утворюється в процесі поділу урану при ядерних вибухах та в енергетичних ядерних реакторах. У природі не зустрічається. Утворюється при розпаді плутонію-241 (період напіврозпаду 14 років). Зважаючи на істотно триваліший (у 31 раз) період напіврозпаду, ніж у материнського ^{241}Pu , дочірній ^{241}Am накопичується в природі, створюючи низку радіоекологічних та технологічних проблем.

Станом на 26.04.1986 р. у паливі реактора IV енергоблоку ЧАЕС за офіційними даними було накопичено $1,8 \times 10^{17}$ Бк плутонію-241 та $1,6 \times 10^{14}$ америцію-241 (табл. 1). За інформацією, наданою урядом СРСР у МАГАТЕ, в складі викиду містилося близько 3% ізотопів плутонію. Оскільки плутоній містився у складі відпрацьованого ядерного палива, це дає підстави для використання величини 3% з метою оцінки кількості викинутого з реактора америцію-241.

Науковим комітетом ООН по дії атомної радіації америцій-241 віднесено до одного з семи найбільш небезпечних радіонуклідів. Америцій-241 – альфа-випромінювач, біологічна дія якого значно вища за гама- та бета випромінення цезію-137 та стронцію-90. Сполуки америцію високо токсичні. Значення допустимої концентрації для америцію-241 в повітрі близько $1 \cdot 10^{-4}$ Бк/л, у воді водоєм – близько 70-80 Бк/л.

Проблема зростання біологічної вагомості америцію-241 полягає в тому, що збільшення америцію-241 відбувається через розпад ізотопів плутонію-241, що є в складі аварійних випадків. В той же час, через радіоактивний розпад відбувається зниження кількості цезію-137 та стронцію-90. З

моменту аварії вже близько 80% плутонію-241 перетворилось на америцій-241. Внаслідок цього зараз внесок ^{241}Am у загальну альфа-активність трансуранових елементів у випадіннях складає близько 57%.

Активність Америцію-241 зростатиме у довкіллі до 2057 року; по тому швидкість його розпаду перевищуватиме швидкість утворення унаслідок вичерпання материнського Плутонію-241 (рис. 7). Наразі його загальна активність у навколишньому середовищі, з урахуванням фізичного розпаду дозотвірних ізотопів, приблизно удвічі менша за активність Стронцію-90, викинутого з реактора IV енергоблоку ЧАЕС (табл. 1).

За експериментальними даними ДСП «Екоцентр», з часом спостерігається істотне збільшення вмісту ^{241}Am у ґрунтах радіоактивно забруднених територій (рис. 8).

Систематичного обстеження радіоактивно забруднених територій України Америцієм-241 протягом 35 років після аварії не проводилося. Характер просторового розподілу забруднення території України Америцієм-241 визначався розрахунковим методом на основі непрямих вимірювань і головним чином відповідає забрудненню ізотопами плутонію (рис. 9, 10). Забруднення зосереджено переважно на території Зони відчуження та Зони безумовного (обов'язкового) відселення.

^{241}Am є альфа-випромінювачем. Утворений при його розпаді радіонуклід ^{237}Np випускає гама-кванти з енергією близько 60 кеВ, за якими вміст ^{241}Am вимірюється на гама-спектрометрах із високою роздільною здатністю.

Мобільність та біологічна доступність Америцію-241 істотно (принаймні вдвічі) більші, ніж материнського Плутонію-241. Це пояснюється тим, що він утворюється не лише з плутонію первинних паливних випадків, а й з уже утворених ним мобільних форм. Дослідження, проведені в ДУ

«Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», свідчать, що за міграційними характеристиками у доквілі Америцій-241 схожий до Цезію-137 [6–8]. Інші дослідники вважають мобільність ^{241}Am значно більшою (у 30 разів більше, ніж материнського ^{241}Pu) [9,10].

Одним із найбільш небезпечних шляхів надходження Америцій-241 в організм людини є інгаляційний. При надходженні через органи дихання цей ізотоп швидко переміщується з легенів у кров та має здатність до накопичення у скелеті та печінці.

Встановлено, що америцій-241 може надходити в організм через шкіру. При пошкодженні шкіряного покриву швидкість всмоктування ^{241}Am зростає у 100-250 разів.

При надходженні з продуктами харчування, америцій-241 невеликою мірою всмоктується у

травному тракті. Основними органами депонування ^{241}Am в організмі тварин і людини є скелет, печінка і нирки. Допустимі концентрації у повітрі населених місць становлять 4×10^{-4} Бк/м³, у питній воді – 1000 Бк/м³ (1 Бк/л).

Дані постійного моніторингу приземного шару атмосфери на промисловому майданчику ЧАЕС, який проводиться Інститутом проблем безпеки АЕС НАН України уже протягом десятків років, свідчать про те, що за нормальних умов активність ^{241}Am у повітрі не перевищує кількох десятків мкБк/м³. Так, протягом 2021 року максимальна активність в районі розташування ЧАЕС склала 7,39, а середня – 2,45 мкБк/м³. Ці значення суттєво нижчі за встановлену Нормами радіаційної безпеки України НРБУ-97 допустиму концентрацію ^{241}Am у повітрі для категорії В (населення) - 400 мкБк/м³.

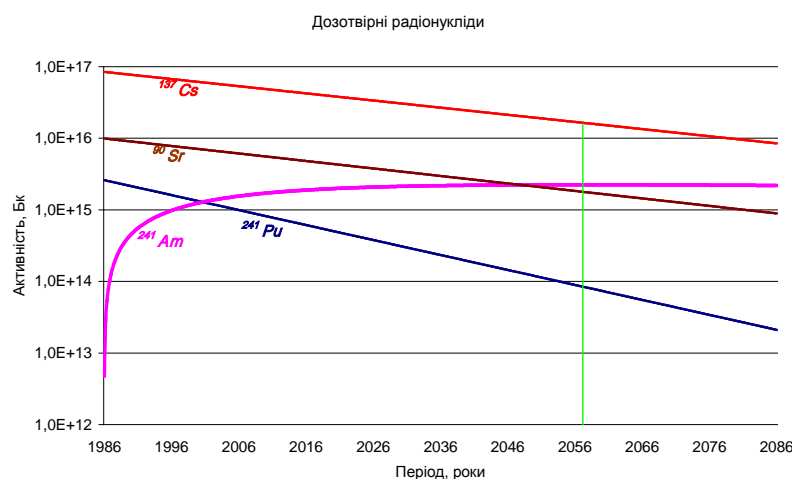


Рис. 7. Динаміка вмісту дозотвірних ізотопів у навколишньому середовищі внаслідок фізичного розпаду (шкала вісі ординат – логарифмічна).

Fig. 7. Changes of the dose-forming isotope content in the environment due to physical decay (in the logarithmic scale of ordinates axis).

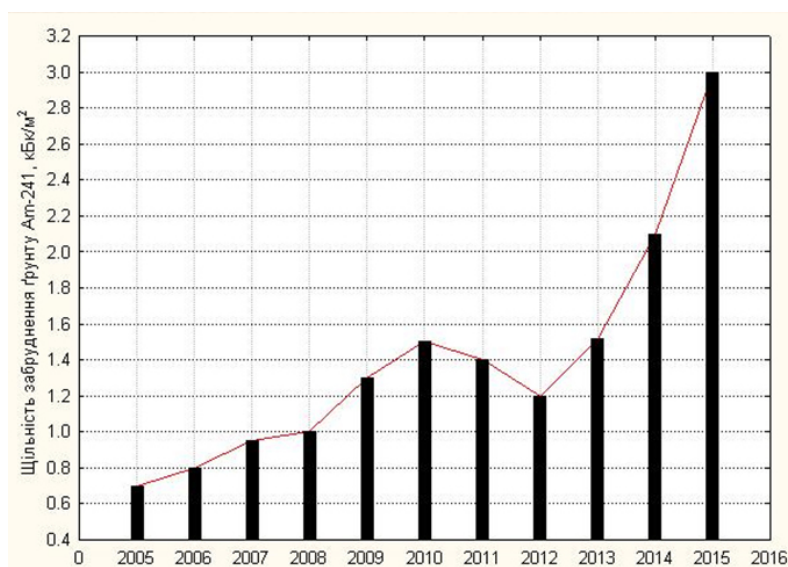


Рис. 8. Динаміка вмісту ^{241}Am у ґрунті с. Дитятки (за даними ДСП «Екоцентр»)

Fig. 8. Dynamics of ^{241}Am content in the soil of v. Dytyatky (according to data from Public Special Enterprise "Ecocenter")

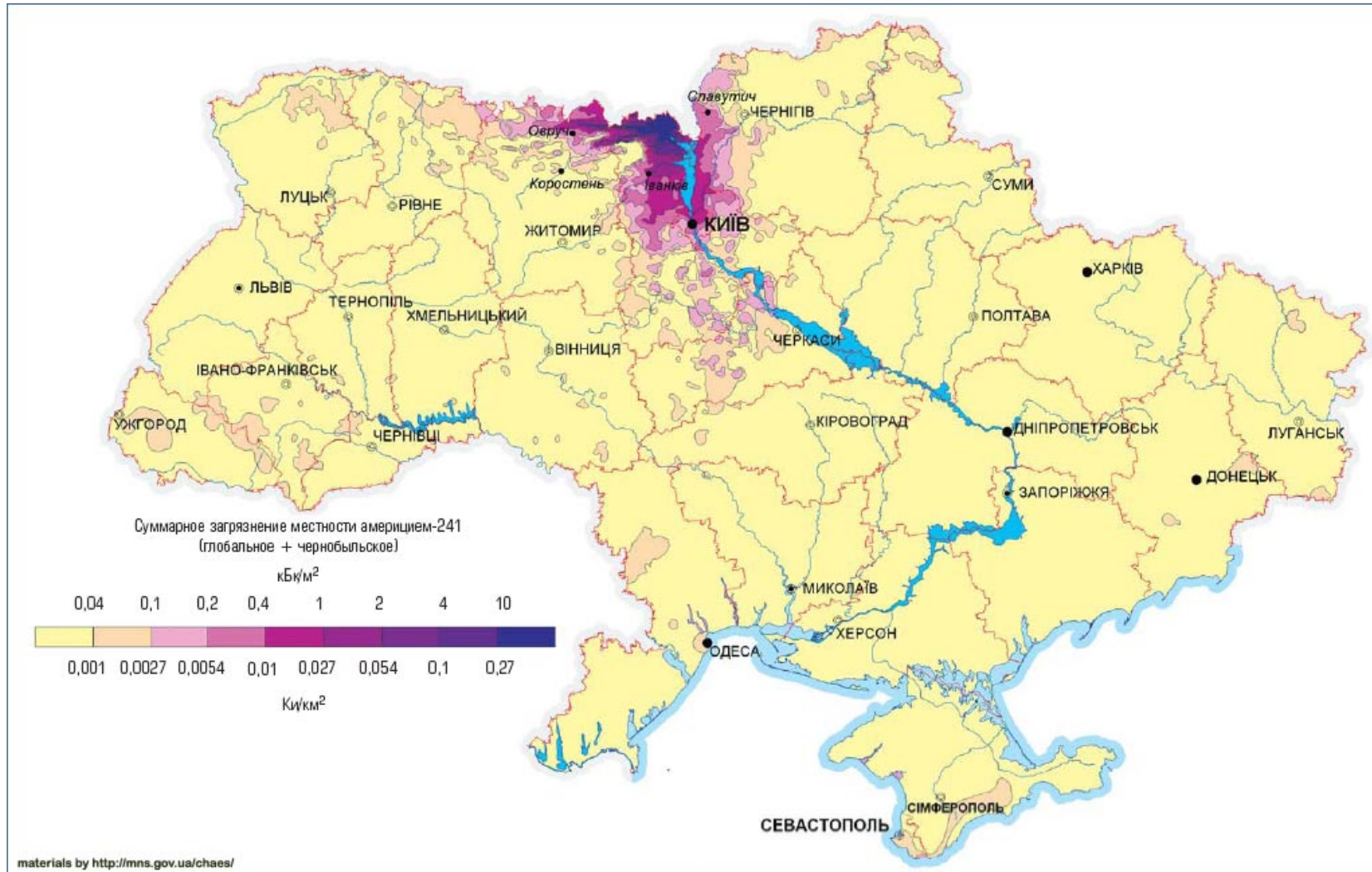


Рис. 9. Забруднення території України америциєм-241 станом на 2006 р.: за даними «Національної доповіді України. 20-років аварії на Чорнобильській АЕС. Погляд у майбутнє» <http://chornobyl.in.ua/uk/karty-radiacia-ukraina.html>

Fig. 9. Contamination of Ukraine with Americium-241 (2006): according to the "National Report of Ukraine. 20 years of the Chernobyl accident. Looking to the future»: <http://chornobyl.in.ua/uk/karty-radiacia-ukraina.html>

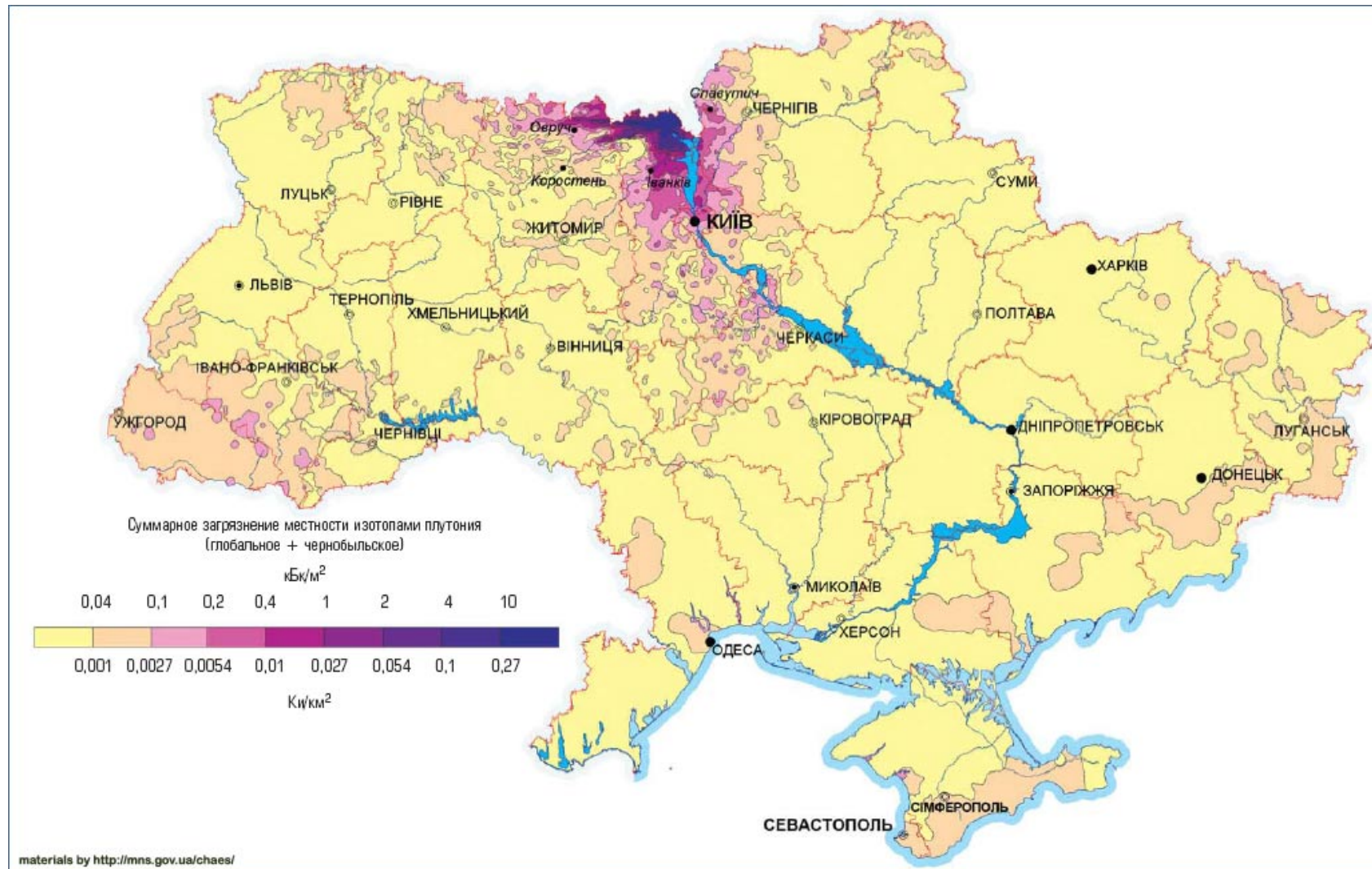


Рис. 10. Забруднення території України ізотопами плутонію станом на 2006 р.: за даними «Національної доповіді України. 20-років аварії на Чорнобильській АЕС. Погляд в майбутнє» <http://chornobyl.in.ua/uk/karty-radiacia-ukraina.html>

Figure 10. Contamination of Ukraine with plutonium isotopes (2006): according to the "National Report of Ukraine. 20 years of the Chernobyl accident. Looking to the future": <http://chornobyl.in.ua/uk/karty-radiacia-ukraina.html>

Стосовно території Чорнобильської зони відчуження варто виділити наступні додаткові джерела емісії радіонуклідів в атмосферу, які можуть суттєво і за короткий час погіршити радіаційний стан:

- техногенні роботи (земляні чи будівельні роботи), що проводяться як на об'єктах поводження з РАВ, так і при виконанні діяльності по підтриманню бар'єрних функцій Чорнобильської зони відчуження;

- наявність гарячих частинок, їх трансформація та повітряне перенесення на далекі відстані (особливо після оголення донних відкладень водоймища – охолоджувача ЧАЕС);

- техногенних інцидентів, пов'язаних із руйнуванням радіаційно забруднених будівельних конструкцій (наприклад, обвалення покрівля машинного залу ЧАЕС, що відбулась в лютому 2013 р., коли концентрації америцію-241 на деяких пунктах контролю перевищували (більш ніж в 3000 разів) допустимі рівні: від $2,8 \cdot 10^{-6}$ Бк/м³ до інциденту та $9,9 \cdot 10^{-3}$ Бк/м³ – після).

Необхідно зазначити, що в екстремальних умовах (під час великих лісових пожеж або пилових бур у зоні відчуження) активність ²⁴¹Am у повітрі безпосередньо біля джерел емісії радіонуклідів в атмосферу може короткочасно збільшуватись до значень порядку 100 – 1000 мкБк/м³.

Брак даних щодо вмісту ²⁴¹Am в об'єктах довкілля зумовлений передусім складністю достовірного визначення його питомої активності. Найбільш точним, проте трудомістким, тривалим і, відповідно, дороговартісним є радіохімічний метод. Окрім проведення низки радіохімічних процедур висококваліфікованими хіміками, метод вимагає дороговартісного обладнання (альфа-спектрометри на основі іонізаційної імпульсної камери або напівпровідникового детектора), яким оснащено одиниці організацій у Києві та Чорнобилі.

Сучасна техніка гама-спектрометрії, що розроблена провідними фірмами протягом останнього десятиліття, дозволяє достовірно виділяти лінію гама-випромінювання Америцію-241 у «м'якій» області (60 кеВ), де вимагається висока роздільна здатність детектора. Проте новітнє обладнання також дороговартісне. Окрім фінансових, існують також політичні обмеження щодо його поставок в Україну.

Фахівцями ДУ ІГНС НАН України під керівництвом чл.-кор. НАН України Забулонова Ю.Л. та проф. Родіонова В.Є. розроблено детектор гама-випромінювання на основі Cd(Tl), який забезпечує роздільну здатність вимірювання у «м'якій» області не менше 1 кеВ. Його вартість у 4-5 разів менша за імпорتنі аналоги. Застосування такого обладнання на борту безпілотного літального апарату (комплексу АЕРОГАМАСКАН) дозволить протягом короткого часу провести обстеження території України на забруднення Америцієм-241, а також істотно

уточнити просторовий розподіл забруднення ізотопами плутонію та ¹³⁷Cs.

Висновки

За 35 років, що минули після Чорнобильської катастрофи, не лише не вирішено ключові проблеми ліквідації її екологічних наслідків, - до цього часу відсутня науково обґрунтована стратегія та не розроблено критерії їх подолання. Таким чином ми перекладаємо тягар вирішення цієї проблеми на майбутні покоління.

Стратегія подолання наслідків Чорнобильської катастрофи повинна носити комплексний характер і бути спрямованою на паралельне вирішення гуманітарних, екологічних, технологічних, міжнародних і політичних питань.

Існує нагальна необхідність розроблення і прийняття Закону України «Про основні засади державної політики щодо подолання наслідків Чорнобильської катастрофи», внесення змін на його основі у чорнобильські закони та розроблення:

- Концепції Національної Програми подолання наслідків Чорнобильської катастрофи

- Закону України «Про загальнодержавну програму подолання наслідків Чорнобильської катастрофи»

- нової редакції «Концепції Чорнобильської зони відчуження».

На часі нагальне розроблення технології видалення та безпечної утилізації високорадіоактивних паливовмісних матеріалів при розбиранні нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття».

У зв'язку з формуванням істотної частини ресурсів підземних вод Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну в межах Поліської низовини, з позицій безпеки життєдіяльності терміново потребує удосконалення система радіогідроекологічного моніторингу критичних ділянок Чорнобильської зони відчуження, які знаходяться під впливом об'єкта «Укриття» та третього енергоблоку ЧАЕС, пунктів тимчасової локалізації та захоронення радіоактивних відходів.

Вимагає нагального вирішення проблема радіоактивного забруднення території України Америцієм-241 у зв'язку з експоненційним характером збільшення його вмісту в навколишньому середовищі, високою мобільністю і небезпекою інгаляційного, трансдермального та перорального надходження в організм людини. Брак результатів досліджень міграції Америцію-241 у системі ґрунт-рослина-тварина-людина веде до надзвичайно широкого (у десятки разів) діапазону оцінок його радіоекологічної небезпеки та опромінення внаслідок перорального надходження.

Зважаючи на те, що найбільш небезпечним шляхом надходження Америцію-241 в організм є інгаляційний, слід очікувати зростання ризиків для здоров'я персоналу працюючих, особового складу пожежних та населення забруднених територій внаслідок вітрового пілопідймання, особливо на згарищах, в умовах пожеж та пилових бур. Необхідно включити до регламенту моніторингу атмосферного повітря населених місць та Зони відчуження і зони обов'язкового (добровільного) відселення визначення вмісту Америцію-241, а також внести корективи у формування туристичних маршрутів у Зоні відчуження з урахуванням характеру вітрового пілопідймання та пілоперенесення.

У цій роботі нами розглянуто далеко не повний перелік сучасних проблем радіоактивно забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи територій України. Автори намагалися звернути увагу на найбільш болючі питання та сподіваються на майбутню підтримку держави щодо їх вирішення.

Подяки. У цій статті використано ідеї, матеріали наукових праць, доповідей, інтерв'ю та публікацій у засобах масової інформації, доповідних записок, звернень до органів державної влади України та міжнародних організацій, які у різний час підготовано академіками НАН України Гродзінським Д.М., Соботовичем Е.В., Шестопаповим В.М., Юхновським І.Р., проф. Токаревським В.В. Автори щиро вдячні співробітникам Інституту проблем безпеки АЕС НАН України, котрі люб'язно надали матеріали для цієї публікації.

Література

1. Экологические последствия аварии на чернобыльской аэс и их преодоление: двадцатилетний опыт МАГАТЭ, Вена, 2008. 199 с. Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf
2. 25 років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього: Національна доповідь України. К.: вид-во КІМ, 2010. 356 с.
3. Краснов В.О., Носовський А.В., Рудько В.М., Щербін В.М., Об'єкт «Укриття» 30 років після аварії, НАН України, Ін-т проблем безпеки АЕС. Чорнобиль (Київ. обл.) : Ін-т проблем безпеки АЕС, 2016. 512 с
4. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П. Ключников А.А., Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС. М.: Наука, 2010. 240 с.
5. Габелков С. В., Долін В. В., Жиганюк І. В., Кудлай В. Г., Пархомчук П. Є., Слівінський В. М., Чиколовцев С. О. Лавоподібні паливовмісні матеріали НБК-ОУ. чорна кераміка. електрона мікроскопія. Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECО 21) : збірник матеріалів VI Міжнародної конференції (27–29 квітня 2021,

м. Славутич). – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. С. 61-65

6. Дубчак С.В., Долін В.В., Кучма М.Д. Розподіл ізотопів Pu і Am у лісових екосистемах Чорнобильської зони відчуження. Доповіді НАН України. 2005. № 5. С. 193-199

7. Дубчак С.В., Долін В.В. Міграція ізотопів америцію та плутонію в ґрунтах лісових екосистем 10-км зони відчуження Матер. Між нар.конф. Двадцять років Чорнобильської катастрофи. Погляд у майбутнє. - Київ, 2006. – С. Т2-37.

8. Дубчак С.В., Долін В.В. Особливості формування та міграції ізотопів америцію і плутонію у ґрунтах та біомасі лісових екосистем Чорнобильської зони відчуження Зб. наук. праць Ін-ту геохімії навколишнього середовища НАН та МНС України. 2006. Вип. 13. С. 61–70.

9. Rasydov N.M. Uptake of americium-241 by plants from contaminated Chernobyl exclusive zone test site soils. III congress radiation research (radiobiology and radioecology), Kiev, 21 - 25 May 2003., p.335.

10. Kutsokon N.K., Rashidov N.M., Grodzinsky D.M. Cytogenetic effects of 241Am in Allium-test / Int. Conference “Genetic Consequences of Emergency Radiation Situations”.

References

1. Ecological consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant and their overcoming: twenty years of experience of the IAEA, Vienna, 2008. 199 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf
2. 25 years of the Chernobyl disaster. Security of the future: National report of Ukraine. К. : KIM Publishing House, 2010. 356 p.
3. Krasnov V.O., Nosovskyy A.V., Rudko V.M., Shcherbin V.M. (2016). Institute of NPP Safety Problems. Chernobyl (Kyiv region): Institute of NPP Safety Problems, 512 p.
4. Arutyunyan R.V., Bol'shov L.A., Borovoy A.A., Velykhov E.P. Klyuchnykov A.A. (2010). М.: Nauka. 240 p.
5. Habyelkov S.V., Dolin V.V., Zhyhanyuk I.V., Kudlay V.H., Parkhomchuk P. YE., Slivinskyy V. M., Chykolovets S.O. (INUDECО 21): Proceedings of the VI International Conference (April 27-29, 2021, Slavutych). Chernihiv: NU "Chernihiv Polytechnic", 2021. pp. 61-65
6. Dubchak S.V., Dolin V.V., Kuchma M.D. (2005). Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine . № 5. pp. 193-199
7. Dubchak S.V., Dolin V.V. (2006) Between the People's Conf. Twenty years of the Chernobyl disaster. Looking to the future. Kyiv, 2006. p. T2-37.
8. Dubchak S.V., Dolin V.V. (2006). Zb. nauk. prats' In-tu heokhimiyi navkolyshn'oho seredovyshcha NAN ta MNS Ukrayiny. Vyp. 13. pp. 61–70.
9. Rasydov N.M. Uptake of americium-241 by plants from contaminated Chernobyl exclusive zone test site soils. III congress radiation research (radiobiology and radioecology), Kiev, 21 - 25 May 2003., p.335.
10. Kutsokon N.K., Rashidov N.M., Grodzinsky D.M. Cytogenetic effects of 241Am in Allium-test / Int. Conference “Genetic Consequences of Emergency Radiation Situations”.

CONTEMPORARY CHALLENGES IN ELIMINATION OF THE CONSEQUENCES OF THE CHORNOBYL CATASTROPHE (IN PLACE OF A FOREWORD)

O.Kopylenko, A. Nosovskii, V.Dolin

Kopylenko O.L., Acad. of NAS of Ukraine, Doctor of Juridical Science, Prof., People's Deputy of Ukraine, Kopylenko@nas.gov.ua

Nosovskii A.V., Acad. of NAS of Ukraine, Dr. Sc. (Techn.), Prof., Director, Institute for Safety Problems of NPP of NAS of Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-2594-3780>, anosov@ispnpp.kiev.ua

Dolin V.V., Dr. Sc.(Geol.), Prof., Deputy Director for Science, State Institution "Institute of Environmental Geochemistry, National Academy of Sciences of Ukraine", ORCID: 0000-0001-6174-2962, vdolin@ukr.net

The article presents the critical analysis of the key problems and the reasons for slow pace of elimination of the consequences of the Chornobyl Catastrophe that are related to the inefficiency of the public administration. During 35 years passed since the Chornobyl Catastrophe, no state strategy for gradual, step by step, elimination of the consequences has been developed. Neither the criteria for its completion have been worked out. Due to the changes in the radioactive contamination structure, accumulation of new knowledge in the field of radiation medicine, agricultural radiology, radiobiology, radiogeochemistry, and radioecology, it is urgent to revise the conceptual provisions of the Chornobyl laws and policy documents, which are mostly based on the 30 year old data. One of the burning unsolved problems of radiation safety is the technological foundations for fuel-containing material management during demolishing of the unstable constructions of the "Shelter" object, the volume of which exceeds 15 tons (UO₂) with total activity reaching 4.8×10^{17} Bq. Imperfection of the radiohydrogeoeological monitoring system in the affected area within the "Shelter" Object and the 3rd ChNPP Unit, sites for temporary localization and disposal of radioactive waste in the Chornobyl Exclusion Zone, in particular, due to man-made changes in the hydrogeological regime, leads to inaccurate assessment of the radioactive contamination and forecaste of the quality of the underground drinking water supply sources. One of the most pressing modern radioecological problems is the accumulation of Americium-241 in the natural environment and its exposure affects. Now the content of this radionuclide outside the destroyed power unit is almost equal to that of ⁹⁰Sr and will increase to the middle of this century. At the same time, its radiobiological efficiency is much higher than the gamma and beta radiation of the dose-generating ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr. The strategy for overcoming the consequences of the Chornobyl catastrophe should be comprehensive and aimed to addressing humanitarian, environmental, technological, international and political issues in complex

Keywords: Chornobyl Catastrophe, overcoming strategy, "Shelter" Object, radioactive contamination, lava-like fuel-containing materials, radioecological issues, radiohydrogeoeological monitoring, radioactive waste disposal and temporary storage facilities, Americium-241.