DOI https://doi.org/10.32782/geotech2022.35.19
УДК 621.039.586:504.064.36

Барбашев С.В., Назаришин В.С.

Барбашев С.В., доктор технічних наук, професор кафедри АЕС, Національний університет «Одеська політехніка», ORCID 0000-0001-5446-153X, josik65@gmail.com, barbashev@op.edu.ua
Назаришин В.С., магістр зі спеціальності «атомна енергетика», Національний університет «Одеська політехніка», volodimirnazarisin@gmail.com, ORCID 0000-0003-1319-0715

ДОВГОСТРОКОВИЙ РАДІОЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ПОВЕДІНКИ PU-239, 240 ТА AM-241 НА ТЕРИТОРІЇ НАВКОЛО ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС

Анотація. *Унаслідок аварії на ЧАЕС ближня зона аварії (10–30 км) була сильно забруднена радіоактивними речовинами, серед яких приблизно 1,5 % від загальної активності викинутих радіонуклідів належить паливній компоненті, до складу якої входять трансуранові елементи, зокрема $^{239,\ 240}$Pu та ^{241}Am. Радіогенні ^{239}Pu і ^{240}Pu, що утворились в атомному реакторі, характеризуються дуже великим періодом напіврозпаду та високою канцерогенністю. Тому, потрапивши в навколишнє середовище, становлять серйозну небезпеку радіологічного впливу на людину протягом багатьох років. ^{241}Am є основним дозоутворювальним чорнобильським радіонуклідом, у якого через різницю періодів напіврозпаду ^{241}Pu (14 років) і ^{241}Am (432 роки) спостерігається з часом зростання активності у навколишньому середовищі. Максимальний вміст ^{241}Am у навколишньому середовищі буде досягнутий через 73 роки після аварії та майже в 40 разів перевищить його аварійне надходження в атмосферу 1986 року. Згодом ^{241}Am буде найвагомішим серед чорнобильських радіонуклідів, хоча і з незначною активністю. Ці факти обумовлюють екологічну небезпеку $^{239,\ 240}$Pu і ^{241}Am протягом тривалого часу й актуальність дослідження їхньої поведінки у навколишньому середовищі. У цій роботі досліджено особливості поведінки $^{239,\ 240}$Pu та ^{241}Am чорнобильського походження у навколишньому середовищі, отримані після аварії у ході комплексного радіоекологічного моніторингу в районі розташування Чорнобильської АЕС. Головною метою роботи є обґрунтування пропозиції щодо організації довгострокового вивчення і прогнозування радіаційної обстановки на території навколо Чорнобильської АЕС, яка формується трансурановими елементами, зокрема $^{239,\ 240}$Pu та ^{241}Am, з використанням методології радіоекологічного моніторингу.*

Ключові слова: *аварія на ЧАЕС, трансуранові елементи, $^{239,\ 240}$Pu, ^{241}Am, навколишнє середовище, радіоекологічний моніторинг.*

Вступ. Перед аварією в реакторі четвертого блоку ЧАЕС знаходилося 180–190 т ядерного палива. Крім палива, в активній зоні у момент аварії містились різні радіоактивні ізотопи, накопичені під час роботи реактора.

Частка паливних частинок, що випали поблизу промислового майданчика Чорнобильської АЕС, згідно з [3, 11] становила 1,5 ± 0,5% всього обсягу викиду. Радіонукліди ^{95}Zr, ^{95}Nb, ^{99}Mo, $^{141,\ 144}$Ce, ^{154,155}Eu, $^{237,\ 239}$Np, $^{238-242}$Pu, ^{241,243}Am і ^{242,244}Cm, були викинуті тільки в матрицях паливних («гарячих») частинок. Понад 90 % активності $^{89,\ 90}$Sr і $^{103,\ 106}$Ru припадало на паливні частинки. Саме частинки ядерного палива, до складу яких входили радіонукліди з великим періодом напіврозпаду, зокрема трансуранові елементи, тривалий час формуватимуть радіоекологічну обстановку на території, де вони випали. Цей факт обумовлює актуальність дослідження їхньої поведінки протягом тривалого часу.

Тому усе важливішим стає контроль забруднення наземних екосистем (ґрунту, рослинності) чорнобильськими ^{239,240}Pu і, особливо, ^{241}Am, у якого з часом спостерігається зростання активності у навколишньому середовищі по відношенню до активності ^{241}Pu. Це пояснюється різницею періодів напіврозпаду ^{241}Pu (14 років) і ^{241}Am (432 роки), який утворюється в ядерному реакторі шляхом захоплення нейтрона ^{238}U і його розпаду за ланцюжком ^{238}U – … – ^{239}Pu – ^{240}Pu – ^{241}Pu – ^{241}Am.

До 2060 року вміст ^{241}Am у навколишньому середовищі перевищить його аварійне надходження в атмосферу у квітні-травні 1986 року понад 40 разів [5]. Згодом ^{241}Am стане найважливішим серед чорнобильських радіонуклідів, хоча і з незначною активністю [9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Особливості поширення плутонію та америцію в навколишньому середовищі після аварії.* Як зазначено вище, під час аварії на ЧАЕС (1986) ближня зона аварії (10–30 км) була сильно забруднена паливною компонентою радіоактивних випадінь, зокрема $^{239,\ 240}$Pu і ^{241}Am. Забруднення поширювалось на захід, північ і південь, що зафіксовано за його слідами [6].

Чітко виражені сліди західного, північного і південного напрямків забруднення ближньої зони ЧАЕС ^{241}Am залишалися помітними і у травні 2011 р. [12].

Нині виявлено, що навіть на значній відстані від ЧАЕС, можна зафіксувати радіонукліди чорнобильського походження, зокрема ^{239} ,^{240}Pu ^{241}Am, які повітряним шляхом здолали великі відстані та випали на земну поверхню в Україні й в інших країнах [4, 7, 8, 10], і будуть забруднювати біосферу ще дуже тривалий час.

Ці результати були одержані різними авторами, у різні роки, завдяки використанню різних підходів і методів. Щоб мати змогу порівнювати результати, отримувані протягом багатьох років на різних територіях, що потрапили під вплив викидів і скидів аварійної АЕС необхідно, щоб дослідження спирались на єдину, перевірену на практиці, методологію **радіоекологічного моніторингу районів розташування АЕС** (РЕМ АЕС). Така методологія повинна забезпечувати рівну точність і отримання представницьких результатів вимірювання радіаційних параметрів, що характеризують **всю** контрольовану територію, враховувати міграційні процеси і бути прив'язані до характеристик джерела викиду.

Мета дослідження. Головною метою роботи є обґрунтування пропозиції щодо організації довгострокового вивчення і прогнозування радіаційної обстановки на території навколо Чорнобильської АЕС, яка формується трансурановими елементами, зокрема ^{241}Am, з використанням методології радіоекологічного моніторингу.

Методи дослідження. В основу роботи покладена методологія радіоекологічного моніторингу території навколо атомних електричних станцій (РЕМ АЕС), створена на кафедрі АЕС Одеського політехнічного інституту (нині Національний університет «Одеська політехніка») й апробована у процесі організації і веденні РЕМ наземних екосистем в районах розташування споруджуваної Одеської АТЕЦ, Запорізької АЕС, що експлуатується, і Чорнобильської АЕС (до і після аварії) [1,2].

Методологія базується на екосистемному підході, який відображає закони життєдіяльності біогеоценозів, визначає поведінку в них забруднювальних речовин різної природи і обумовлює припустимі для екосистем відхилення за різного техногенного і антропогенного впливу.

Основні положення методології радіоекологічного моніторингу районів розташування АЕС є такими:

1. Методологія РЕМ АЕС повинна враховувати екологічні особливості навколишнього середовища (типи ландшафтів, геохімічні особливості ландшафтів тощо), міграційні характеристики навколишнього середовища (метеоумови, поверхневі стоки, геохімічні бар'єри, місця накопичення тощо) й інші чинники, що визначають радіаційний вплив на населення і навколишнє природне середовище.

2. Науковою основою методології РЕМ АЕС має бути вчення про екосистеми і геохімію ландшафтів.

3. Критичними елементами навколишнього середовища, які формують радіаційну обстановку і створюють дозові навантаження на населення в районі розташування АЕС за штатного режиму її роботи, а також у середній і пізній фазах аварії, є наземні екосистеми (ґрунт, рослинність, зокрема сільськогосподарська тощо).

4. У випадку комунальної радіаційної аварії РЕМ навколишнього середовища в районі впливу АЕС повинен базуватись на еколого-гігієнічних принципах протирадіаційного захисту і враховувати особливості атмосферного перенесення аварійного викиду, фізико-географічні та ландшафтно-геохімічні характеристики місцевості.

5.Основними методичними підходами до організації і ведення радіоекологічного моніторингу є районування території спостереження за фізико-географічними і ландшафтно-геохімічними характеристиками та формування з урахуванням цього мережі пунктів спостереження.

6. Основний принцип районування території зони спостереження АЕС полягає в розбитті її на ділянки максимально однорідні щодо процесів надходження, міграції та накопичення радіонуклідів та (або) інших хімічних елементів і речовин. Такий спосіб дає можливість вивчити міграцію забруднювальних речовин, виділити місця їх можливого накопичення і сформувати представницьку мережу пунктів спостереження.

7. Формування мережі пунктів РЕМ базується на результатах районування території розташування АЕС з урахуванням метеоумов, рельєфу місцевості, типів ландшафтів і грунтів, щільності радіоактивного забруднення території спостереження, чисельності населення, яке проживає в зоні контролю, й інших характеристик місцевості, які піддаються кількісним оцінкам. Представництво пробовідбору за таких умов досягається за рахунок відбору середніх проб, які складаються з багатьох (25–40) індивідуальних проб, відібраних за методом конверта, які дають змогу врахувати всі особливості контрольованої території. Для досягнення рівної точності результатів вимірювань, що характеризують забруднення виділених районів, кількість середніх проб між усіма елементами території розподіляють пропорційно величині площі, щільності забруднення, чисельності населення й іншим значущим факторам, які піддаються кількісному обліку, за допомогою вагових коефіцієнтів.

Розроблена методологія забезпечує рівну точність і отримання представницьких результатів вимірювання радіаційних параметрів, що характеризують **всю** контрольовану територію, максимальну ймовірність виявлення забруднення викидами за будь-яких метеоумов, ураховує міграційні процеси і прив'язку до характеристик джерела викиду.

У процесі екологічних досліджень для обробки й аналізування даних рекомендується застосовувати методи математичної статистики і математичного моделювання (з метою прогнозування), використовувати елементи ГІС-технології, методи аерокосмічного моніторингу для дослідження стічних процесів.

Виклад основного матеріалу дослідження. У ході радіаційного моніторингу ближньої зони ЧАЕС

(10–50 км), виконаного співробітниками кафедри атомних електричних станцій Одеського політехнічного інституту (нині Національний університет «Одеська політехніка») в 1986 (після аварії) та в 1991–1992 рр. із застосуванням розробленої методології, основні положення якої наведені вище, отримано такі результати щодо радіаційного забруднення поверхневого шару ґрунту [1]:

1. Забруднення ґрунту дозоутворювальними і біологічно значущими радіонуклідами ^{137}Cs, ^{134}Cs, ^{90}Sr, а також ^{144}Ce, який має підвищені міграційні характеристики в ґрунті, та паливними нуклідами $^{239+240}$Pu, визначається складною взаємодією атмосферних явищ з ландшафтами, зокрема з рельєфом місцевості, і характеризується малою динамікою.

2. Забруднення ґрунтів десятикілометрової зони ЧАЕС $^{239+240}$Pu має вигляд чітко виражених слідів західного, північного і південного напрямків, що практично співпадає з результатами, одержаними іншими дослідниками.

3. Чорнобильські радіонукліди, саме ізотопи плутонію, в ближній зоні ЧАЕС інтенсивно мігрують вертикально і слабо горизонтально; близько 50% активності $^{239+240}$Pu знаходиться на глибині 0−10 см, тобто в області активної біологічної взаємодії.

Підсумовуючи всі результати, отримані співробітниками Одеського політехнічного інституту під час РЕМ Чорнобильської АЕС у післяаварійний період (пізня фаза комунальної аварії) [1], слід наголосити:

1. Основним фактором, що формував радіаційну обстановку місцевості в початковий період аварії (гостра фаза аварії), було атмосферне перенесення викинутих із ЧАЕС радіонуклідів та їх осадження на поверхню землі.

2. Початковий перерозподіл осаджених з радіоактивної хмари радіонуклідів далі відбувався внаслідок дії вторинного забруднення місцевості (вітрове перенесення, змив, стоки), вплив якого, якщо не вжити відповідних заходів, може виявлятися досить тривалий час.

3. Післяаварійне забруднення ґрунту визначено складною взаємодією атмосферних явищ з рельєфом місцевості та ландшафтами і характеризується слабкою динамікою.

4. Було передбачено, що ландшафтно-геохімічні особливості території, забрудненої аварійними радіонуклідами, в перші роки після аварії не повинні значно впливати на латеральну міграцію та накопичення радіонуклідів за умови, що геохімічна структура території не буде спеціально змінена. Вплив ландшафтно-геохімічних особливостей на їх перерозподіл проявлятиметься не раніше, ніж через 10 – 15 років. Тоді радіонукліди мали почати помітно впливати на формування радіаційної обстановки у зоні, що постраждала від аварії.

Таким чином, результати післяаварійного радіоекологічного моніторингу чорнобильської зони дали підставу вважати, що довгострокове оцінювальне прогнозування радіаційної обстановки та можливих дозових навантажень на людей та біоту у зоні аварії у цей період не тільки можна, але й потрібно виконувати з використанням даних, що враховують ландшафтно-геохімічні особливості розподілу радіонуклідів.

Звідси випливає **наша пропозиція: довгострокове вивчення і прогнозування радіаційної обстановки в післяаварійний період проводити з використанням методології РЕМ АЕС, що дає змогу отримувати об'єктивні результати, наприклад, методології розробленої в Одеському політехнічному інституті.**

Дотримуючись такої методології, мережу пунктів моніторингу рекомендовано формувати на підставі ландшафтно-геохімічного районування досліджуваної території і даних, що враховують вплив ландшафтно-геохімічних особливостей на розподіл по території різних радіонуклідів станційного походження.

У процесі формування мережі пунктів моніторингу, яку можна використовувати для вивчення динаміки змісту, розподілу і міграції трансуранових радіонуклідів у ґрунтах і рослинності зони відчуження ЧАЕС тривалий час, за основу пропонуємо взяти мережу пунктів моніторингу, сформовану в Одеському політехнічному інституті спеціально для РЕМ сильно забрудненої ближньої зони ЧАЕС в післяаварійний період [1], за допомогою якої були отримані результати, застосовані для планування протирадіаційних і реабілітаційних заходів (рис.1). Однак, варто зауважити, що запропоновану після аварії 1986 р. схему розташування пунктів моніторингу нині треба уточнити з урахуванням стану зони контролю в даний час з огляду на наслідки воєнних дій на території навколо ЧАЕС.

Висновки. 1. Довгострокове вивчення і прогнозування радіаційної обстановки, яку формують у післяаварійний період трансуранові елементи, зокрема ^{241}Am, пропонуємо виконувати з використанням розробленої на кафедрі АЕС Одеського політехнічного інституту методології РЕМ АЕС. Вона забезпечує можливість отримувати представницькі результати вимірів рівної точності по всій досліджуваній території. Методологію апробовано під час організації і веденні РЕМ наземних екосистем у районах розташування споруджуваної Одеської АТЕЦ, Запорізької АЕС, що експлуатується, і Чорнобильської АЕС (до і після аварії).

2. Дослідження динаміки вмісту, розподілу і міграції трансуранових радіонуклідів в грунтах, рослинності ближньої зони ЧАЕС протягом тривалого часу, пропонуємо здійснювати з використанням мережі пунктів моніторингу, сформованої на основі методик, розроблених згідно з методологією РЕМ АЕС, спеціально для РЕМ ближньої зони ЧАЕС в післяаварійний період.

3. Надалі дослідження трансуранових елементів чорнобильського походження варто продовжувати в напрямку глибшого та всебічного вивчення особливостей поведінки таких радіонуклідів (в першу чергу ^{241}Am) у навколишньому природному середовищі. Це допоможе виконати **реальне на теперішній час картування** забруднення ними території України, що

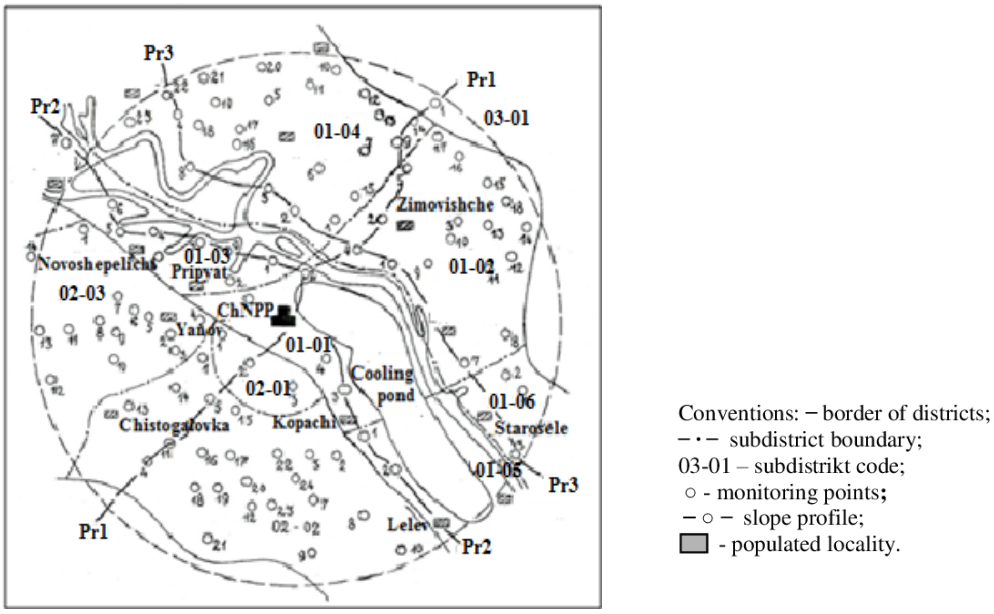


Fig. 1. Scheme of zoning of the territory with a radius of 10 km around the Chernobyl NPP and a network of monitoring points in the post-accident period [1]

за всі роки після аварії так і не було зроблено. Таке картування повинно бути засновано на даних, отриманих під час проведення РЕМ цих територій. Важливими видаються також дослідження, спрямовані на з'ясування внеску америцію-241 у формування дози внутрішнього опромінення населення районів України, територія яких зазнала забруднення чорнобильськими радіонуклідами. Таким чином можна визначити рівень радіаційної небезпеки америцію-241 та інших трансуранових елементів для населення як нині, так і в довгостроковій перспективі.

References

1. Barbashev, S.V. (2009), The system of complex ecological monitoring of Ukraine NPP location. (Doctoral dissertation). Odessa National Polytechnic Institute, Odessa [in Russian].

2. Diachuk, V.A., Prister, B.S. et al. (1990), Guidelines forintegrated (radiological, chemical) monitoring of soils and landscapesinthe vicinity of nuclear powerplants. Leningrad, 239-249 [in Russian].

3. Environmental consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant and their overcoming: twenty years of experience of the IAEA. Vienna, 2008, 199 p. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf. [in Russian].

4. Gurachevsky, V.L. (2017), On the radiation situation in Belarus after the Chernobyl accident (according to 2016 data). Minsk: 302-308. [in Russian] URL: https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/1570/1/Gurachevskij-V-L-O-radiacionnoj-obstanovke.pdf

5. Ivanov, E.A., Ramzina, T.V., Khamyanov, L.P., Vasilchenko, V.N., Korotkov, V.T., Nosovsky, A.V., Oskolkov, B.Ya. (1994), Radioactive contamination of the environment with ^{241}Am due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Atomnaya energiya,* 77, (2): 140-145. URL: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t77-2_1994/go,56/ [in Russian].

6. Izrajel', Yu.A. (2006), Radioactive contamination of natural environments as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Moscow.: Komtekhprint. URL: http://www.ibrae.ac.ru/images/stories/ibrae/chernobyl/israel.pdf [in Russian].

7. Metelsky, J.W. (2021*).* Chernobyl - the largest nuclear disaster in the history of mankind]. Portal Polskiego radia SA. URL: https://www.polskieradio.pl/397/7836/Artykul/2723663 [in Russian].

8. Plotnikov, M.A. (2007), Detection of americium-241inthenaturalenvironmentofthePenzaregio].*IzvestiyaPGPU* No. 3 (7): 307-308. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obnaruzhenie-ameritsiya241-v-prirodnoy-srede-penzenskogo-regiona [in Russian].

9. Consequences of exposure to human health as a result of the Chernobyl accident. (2012). URL: https://www.unscear.org/docs/reports/2008/12-55525_Report_2008_Annex_D_RUSSIAN.pdf [in Russian].

10. Forecast of pollution of Ukraine by Americium-241 in 2050. URL: http://chornobyl.in.ua/karta-radionulid-ukraine.html [in Ukrainian].

11. *Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.* (2000), *UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes*,V.II: Effects. United Nations New York, 451-566. URL: https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Annex-J.pdf.

12. Contamination of the near 30-km zone of the Chernobyl nuclear power plant with ^{241}Am fuel particles. URL: http://dazv.gov.ua/dostup-do-publichnoji-informatsiji/karty-radiatsiinoho-zabrudnennia-zony-vidchuzhennia.html/ [in Ukrainian].

LONG-TERM RADIOECOLOGICAL MONITORING OF PU-239,240 AND AM-241 BEHAVIOUR ON THE TERRITORY AROUND THE CHORNOBYL NPP

S. Barbashev, V. Nazaryshyn

Barbashev S.V., D. Sc. (Eng.), Professor of the NPP Department, Odessa Polytechnic National University, ORCID 0000-0001-5446-153X, josik65@gmail.com, barbashev@op.edu.ua
Nazaryshyn V.S., Master's degree in Nuclear Energy, Odessa Polytechnic National University, volodimirnazarisin@gmail.com

Abstract. *During the Chornobyl accident, the near accident area (10-30 km) was heavily contaminated with radioactive substances, of which approximately 1.5% of the total activity of emitted radionuclides belongs to the fuel component, which includes transuranic elements, such as ^{239,240} Pu and ^{241}Am. Radiogenic ^{239}Pu and ^{240}Pu formed in a nuclear reactor are characterized by a very long half-life and high carcinogenicity and therefore, if released into the environment, will pose a serious risk of radiological exposure to humans for many years. ^{241}Am is the main dose-forming Chornobyl radionuclide, which due to the difference in the half-lives of ^{241}Pu (14 years) and ^{241}Am (432 years) is observed over time with increasing activity in the environment. The maximum content of ^{241}Am in the environment will be reached 73 years after the accident and will be 40 times higher than its emergency release into the atmosphere in 1986. Eventually, ^{241}Am will be the most significant of the other Chornobyl radionuclides, albeit with little activity. These facts will cause environmental hazards of ^{239,240} Pu and ^{241}Am for a long time and the relevance of the study of their behaviour in the environment. This paper examines the behavioural characteristics of ^{239,240} Pu and ^{241}Am of Chornobyl origin in the environment, obtained during a comprehensive radioecological monitoring in the area of the Chornobyl NPP after the accident. The main purpose of the work is to substantiate the proposal for long-term study and forecasting of the radiation situation in the area around the Chornobyl nuclear power plant, which is formed by transuranic elements, including ^{239,240} Pu and ^{241}Am, using radioecological monitoring methodology.*

Key words: *Chornobyl accident, transuranic elements, ^{239,240}Pu, ^{241}Am, environment, radioecological monitoring.*