

# INUDECO

СЛАВУТИЧ / УКРАЇНА



## **VII МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ**

«Проблеми зняття з експлуатації  
об'єктів ядерної енергетики та  
відновлення навколишнього  
середовища»

**INUDECO 2022**

## **VII INTERNATIONAL CONFERENCE**

on Nuclear Decommissioning  
and Environment Recovery

**INUDECO 22**



СЛАВУТИЦЬКА МІСЬКА РАДА  
КИЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

**VII Міжнародна конференція**  
**ПРОБЛЕМИ ЗНЯТТЯ**  
**З ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЯДЕРНОЇ**  
**ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВІДНОВЛЕННЯ**  
**НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

**Seventh International Conference**  
**on Nuclear Decommissioning**  
**and Environment Recovery**  
**INUDECO 22**

(27–28 квітня 2022 року, м. Славутич)

Збірник матеріалів

Чернігів  
НУ «Чернігівська політехніка»  
2022

УДК 621.039

П78

*Друкується за Рішенням виконавчого комітету Славутицької міської ради Київської області від 16.02.2022 №33 «Про проведення VII Міжнародної конференції INUDECО 22».*

П78 **Проблеми** зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECО 22) : збірник матеріалів VII Міжнародної конференції (27–28 квітня 2022, м. Славутич). – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – 126 с.

ISBN 978-617-7932-42-9

Збірник матеріалів VII Міжнародної конференції «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища», яка пройшла 27-28 квітня 2022 року в місті Славутичі (Україна), з метою розгляду проблем і перспектив, підвищення рівня ефективності науково-практичних досліджень, налагодження співпраці та обміну досвідом у сфері зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики й поводження з радіоактивними відходами та відпрацьованим ядерним паливом.

Збірник призначений для вчених і фахівців з атомної енергетики та промисловості. У збірнику представлені тези доповідей засідання конференції.

Конференція організована за підтримки: виконавчого комітету Славутицької міської ради Київської області; Державного агентства з управління зоною відчуження, Державного спеціалізованого підприємства «Чорнобильська атомна електростанція»; Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України; Інституту проблем математичних машин і систем НАН України.

Це видання надруковано за сприяння КП "Агентство регіонального розвитку" Славутицької міської ради Вишгородського району Київської області.

#### **Програмний науковий комітет (Оргкомітет)**

##### **Програмний науковий комітет (Оргкомітет)**

##### **Співголова оргкомітету**

Фомічев Юрій – міський голова м. Славутича

##### **Співголова оргкомітету**

Носовський Анатолій – директор Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України

##### **Заступники голови оргкомітету:**

Линкевич Олександр – заступник міського голови м. Славутича з питань діяльності виконавчих органів ради;

Савельєв Максим – науковий співробітник Інституту проблем математичних машин і систем НАН України.

##### **Члени оргкомітету:**

Сейда Валерій – т.в.о. генерального директора ДСП «Чорнобильська АЕС»;

Крамаренко Євген – Голова агентства України з управління зоною відчуження;

Згуровський Михайло – ректор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського»;

Морозов Анатолій – Президент Академії технологічних наук України, директор Інституту проблем математичних машин та систем НАН України;

Лавренів Данило – виконавчий секретар ГО «Українське ядерне товариство»;

Супрун Григорій – директор ВП «Атомремонтсервіс».

**УДК 621.039**

ISBN 978-617-7932-42-9

## ИНУДЕСО 2022: підсумки роботи

27-28 квітня у Славутичі проходила Сьома Міжнародна конференції «Проблеми виведення з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища» ІНУДЕСО.

168 учасників, 35 інституцій з 20 країн світу, 64 доповіді, 15 годин безперервної роботи в онлайн – така статистика важливого міжнародного наукового форуму, що зібрав представників державного та приватного секторів, неурядових та наукових організацій.

Подія є щорічною, проте цього разу тема ІНУДЕСО 2022 – **«Виклики ядерної енергетики України у військовий час»**. Наукова та професійна спільнота, а також міжнародні організації в ядерній сфері проаналізували досвід війни в Україні, зробили перші висновки щодо наслідків прояву ядерного тероризму, обговорили можливі рекомендації з експлуатації АЕС та інших ядерних об'єктів в умовах військового часу.

Щороку 26 квітня під час ІНУДЕСО ми усі разом згадуємо Чорнобильську катастрофу, найстрашнішу атомну катастрофу в історії людства. Але цього року замало просто згадати Чорнобиль – у 2022-му росія створила нові загрози, які могли б перевершити навіть ту найстрашнішу аварію. Своїми терористичними діями, пов'язаними із обстрілом і захоптом ядерних об'єктів, росія порушила всі світові принципи ядерної безпеки. Дії російських окупантів нині класифікуються як злочини та ядерний тероризм.

На конференції виступили – Славутичський міський голова Юрій Фомічев, директор Інституту проблем безпеки АЕС НАН України Анатолій Носовський, перший заступник Міністра енергетики Юрій Власенко, заступник голови Державного агентства України з управління Зоною Відчуження Максим Шевчук, радниця Міністра захисту довкілля та природних ресурсів Лала Тарапакіна, Народна депутатка України Ольга Василевська-Смаглюк, представниця комітету ВР України з питань екологічної політики та природокористування Ірина Гуцало, начальник відділу стратегічного планування ДСП «Чорнобильська АЕС» Дмитро Стельмах, ветеран атомної енергетики Микола Штейнберг, голова спілки ветеранів атомної енергетики та промисловості України Максим Кремень, завідувач кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна Сергій Литовченко, перший директор Об'єкту Укриття на ЧАЕС Валентин Купний.

Крім того, потужним був голос міжнародної спільноти, на ІНУДЕСО виступили – голова сектору ядерної безпеки та гарантій Європейської комісії Паскаль Дор (Франція), Президент Американського ядерного товариства Стів Несбіт (США), віце-президент Європейського ядерного товариства Крістіан Легрен (Бельгія), міжнародний експерт Plejades GmbH Норберт Молітор (Німеччина), директор Університету Фукушіма професор Нанба (Японія), експерт з ядерної енергетики Моравсько-Сілезького енергетичного центру Далібор Матею (Чехія), професор Лембіт Шівер з Технологічного університету Чалмерса та Інституту ядерної фізики Чеської академії наук (Чехія), Мегумі Сугімото з Університету Кюсю (Японія), Яннік Вербелен з Університету Бристоля (Велика Британія), Джейк Хекла та Кай Веттер з Університету Берклі (США), Накахіро Ясуда, Татсу Торі, Марк Железняк з Університету Фукушіми

(Японія), Азбі Браун з компанії SAFECAST (Нідерланди), Ігор Пір з компанії ALPHA ATOM LLC (Ізраїль) тощо.

Модератори конференції стали - Арина Старовойтова, директорка Агентства регіонального розвитку м.Славутича; Максим Савельєв – старший науковий співробітник Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України; Данило Лавренов – виконавчий секретар Українського ядерного товариства.

Запис роботи конференції:

27 квітня на YouTube Українського ядерного товариства  
<https://bit.ly/3SUfHZJ>

28 квітня на YouTube Славутицької міської ради <https://bit.ly/3ZnKIYw>

Більше інформації про історію конференції, контакти організаторів є на офіційному веб-сайті [www.inudeco.pro](http://www.inudeco.pro)

Під час роботи конференції завдяки благодійним внескам учасників зібрано 17 200 грн до БФ ЧАЕС. СЛАВУТИЧ. РОЗВИТОК. Дякуємо усім, хто долучився! Всі кошти були направлені на гуманітарні цілі. Детальна інформація про Фонд на офіційному веб-сайті [www.helpslavutych.arr.in.ua](http://www.helpslavutych.arr.in.ua)

Організатори конференції:

- виконавчий комітет Славутицької міської ради Вишгородського району Київської області;

- Комунальне підприємство «Агентство регіонального розвитку» м.Славутича;

- Державне агентство України з управління зоною відчуження, Державне спеціалізоване підприємство «Чорнобильська АЕС»;

- Інститут проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України;

- Українське ядерне товариство

- Славутицька філія Національного технічного університету України «КПІ імені Ігоря Сікорського»

- Організаційний комітет конференції дякує партнерам:

- Національна академія наук України,

- Академія технологічних наук України,

- Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

- Асоціація підприємств промислової автоматизації України,

- Відокремлений підрозділ Державного підприємства «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» «Атомремонтсервіс»,

- Інститут проблем математичних машин і систем НАН України,

- Чернігівський національний технологічний університет,

- інші інституції та громадські об'єднання.

**До зустрічі у Славутичі на INUDECO 23!**

**РЕЗОЛЮЦІЯ**  
**VII Міжнародної конференції «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів**  
**ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища»**  
**INUDESCO 2022**

**27-28 квітня 2022 року**

24 лютого 2022 року російські війська вторглися в Україну. Того ж дня Чорнобильська АЕС та Зона відчуження були захоплені російським агресором. Пізніше агресор окупував Запорізьку АЕС, здійснював обстріляти ядерної установки у Харкові, місті з мільйонним населенням. Над діючими АЕС України неодноразово було відзначено прольоти крилатих ракет. Запорізька АЕС зазнала обстрілів танковими снарядами.

Окупація Чорнобильської та Запорізької АЕС призвела до фактичного руйнування систем фізичної ядерної безпеки об'єктів; системи аварійної готовності; відповідальності за ядерні збитки; до порушення системи обліку та контролю ядерних матеріалів, а отже і режим нерозповсюдження ядерної зброї.

31 березня російські окупанти покинули територію Зони відчуження. На території Зони відчуження та Чорнобильської АЕС російськи окупанти залишили пограбовані приміщення підприємств та установ, знищено унікальні наукові лабораторії, пограбовано офісну техніку, потрощено лабораторне і вимірювальне обладнання, автомобільна спеціальна техніка тощо.

Запорізька АЕС і місто Енергодар досі захоплені та контролюються російськими військовими. Створено неприпустимі психологічні умови для діяльності персоналу, що підтримує безпеку ядерних установок, існує пряма загроза життю персоналу.

Акти ядерного тероризму здійснені не лише військовими, а й високопоставленими спеціалістами та керівниками ядерної енергетики держави-агресора. Дії держави-агресора, беззмінного члена Ради безпеки ООН, засновника ООН та МАГАТЕ може бути класифіковано не інакше, як ядерний тероризм.

Учасники конференції констатують, що в цій ситуації дії МАГАТЕ виявилися абсолютно недостатніми щодо ситуації, що склалася. Міжнародне агентство з атомної енергії більше двох місяців від початку агресії не наважується заявити про глобальну загрозу ядерній безпеці, про порушення режиму нерозповсюдження ядерної зброї, і навіть не визначило дії держави – агресора актами ядерного тероризму. МАГАТЕ, як одна з ланок системи ООН, порушила власний статут, не зажадала скликання Ради безпеки ООН у зв'язку зі скоєними актами ядерного тероризму та загрозою режиму нерозповсюдження ядерної зброї.

Не менш стриманою була й поведінка інших міжнародних організацій, пов'язаних з використанням ядерної енергії в мирних цілях: Агентства з ядерної енергії (OECD/NEA), Всесвітньої асоціації організацій, які експлуатують атомні електростанції (WANO), Всесвітньої ядерної асоціації (WNA), Асоціація регулюючих органів Західної Європи (WENRA) та ін.

Учасники конференції вважають, що подальша бездіяльність МАГАТЕ, а також інших міжнародних організацій, що представляють інтереси ядерної енергетики є прихованою підтримкою безперервних актів ядерного тероризму та становлять пряму загрозу майбутньому ядерної енергетики.

Учасники конференції зазначають, що терористичні дії держави – агресора і військові дії в Європі, де діють близько 200 блоків АЕС, несуть пряму загрозу важких ядерних аварій з усіма наслідками для життя і здоров'я населення, навколишнього природного середовища.

Ситуація, що складається, може також вплинути на перспективи використання ядерної енергії в мирних цілях, оскільки АЕС та інші ядерні об'єкти мирного призначення не можуть протистояти навмисному або ненавмисному впливу сучасної військової зброї.

Конференція вважає, що в умовах війни (бойового впливу) безпека АЕС не може бути забезпечена, а наслідки такого впливу на життя та здоров'я людей та стан навколишнього природного середовища можуть бути катастрофічними у масштабах континентів, а не окремих країн.

Конференція зазначає, що в умовах війни (бойових дій) АЕС не відповідає та не може відповідати умовам та межах безпеки, які обґрунтовані у звітах з аналізу безпеки, на підставі яких видано ліцензії на їх експлуатацію. Це означає, що АЕС, які знаходяться на території бойових дій або потенційних бойових дій знаходяться поза правовими рамками, що регулюються міжнародними конвенціями (угодами), а отже можна прямо заявляти, що в результаті дій держави-агресора, міжнародний режим ядерної безпеки сьогодні не діє.

Конференція проходить у місті-супутнику Чорнобильської АЕС - Славутич, який внаслідок дій російських окупантів був повністю ізольований від самого початку військового вторгнення, пережив гуманітарну катастрофу, на певний час опинився під російською окупацією. 03 квітня Збройні сили України увійшли до Славутича.

Конференція проходить у Славутичі з 2016 року в рамках заходів до роковин аварії на Чорнобильській АЕС. У 2022 році 168 учасників з більше ніж 20 країн (зокрема, України, Європейського Союзу, Великої Британії, США, Японії, Ізраїлю та інші). Учасники конференції – представникам 35 інституцій з державного та приватного секторів, неурядових та наукових організацій представили 64 доповіді та провели 15 годин безперервної роботи в онлайні.

Від України у роботі конференції взяли участь представники Міністерства енергетики та вугільної промисловості України, Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, Державного агентства України з управління зоною відчуження, ДСП «Чорнобильська АЕС», Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України, комітету Верховної Ради України з питань екологічної політики та природокористування, Українського ядерного товариства, Національного технічного університету України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Академії технологічних наук України, ВП ДП «НАЕК «Енергоатом» «Атомремонтсервіс», Інституту проблем математичних машин і систем НАН України, Чернігівського національного технологічного університету, Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна та інші.

У роботі конференції взяли участь представники іноземних та міжнародних організацій: Сектору ядерної безпеки та гарантій Європейської комісії, Американського ядерного товариства, Європейського ядерного товариства, Університету Фукушіма (Японія), Університету Кюсю (Японія), Plejades GmbH (Німеччина), Університету Берклі (США), Технологічного університету Чалмерса (Чехія), Інституту ядерної фізики Чеської академії наук (Чехія) та інші.

Учасники конференції переконані, що наукова та професійна спільнота, а також міжнародні організації в ядерній сфері мають достатньо потужний голос аби змусити накладити конкретні санкції в атомному секторі на країну, війська якої обстрілюють та захоплюють ядерні об'єкти інших країн.

Зважаючи на загрозу безпеці об'єктам мирного використання ядерної енергії в мирних цілях, що склалися внаслідок дій агресора, держави – ядерного терориста проти України учасники конференції INUDECО 2022:

1. Закликають МАГАТЕ та інші світові міжнародні наукові та промислові організації, що працюють у ядерній сфері, визнати, що військові дії Російської Федерації, розпочаті 24 лютого 2022 року з впливом на безпеку ядерних об'єктів в Україні, завдають шкоди ядерній безпеці, є незаконними та абсолютно неприйнятними.

2. Закликають МАГАТЕ та інші міжнародні наукові та промислові організації в ядерній галузі визнати військові дії РФ щодо ядерних об'єктів України випадком ядерного тероризму; визнати РФ державою з ядерною зброєю; обмежити доступ РФ до новітніх ядерних технологій; повністю припинити співпрацю з РФ у ядерній сфері; виключити РФ, а також усіх представників РФ, з органів управління.

3. Вимагають вжити всіх можливих заходів для припинення ядерного тероризму РФ, виводу її військових формувань з території ЗАЕС та встановлення демілітаризованих зон навколо усіх українських АЕС.

4. Наполягають, щоб генеральний директор і Рада керуючих МАГАТЕ виконали, положення статей III, B.4. та XII.C. Статуту Агентства і зажадали від агресора негайного усунення всіх випадків недотримання вимог міжнародних конвенцій та угод у частині фізичного захисту ядерного матеріалу, повідомили про ці факти всім членам Агентства, а також Раді Безпеки та Генеральній Асамблеї Організації Об'єднаних Націй.

5. Звертаються до міжнародних організацій, пов'язаних з використанням ядерної енергії в мирних цілях та ядерної безпеки (Euroatom, WENRA, WANO, ICRP, OECD/NEA, ENSREG, а також національним органам ядерного регулювання та експлуатуючим організаціям) рішуче засудити дії держави – ядерного терориста та вчинити тиск на його структури з метою негайного припинення актів ядерного тероризму, які несуть пряму загрозу безпеці ядерних установок та перспектив розвитку ядерної енергетики.

6. Пропонують органам ядерного регулювання та експлуатуючим організаціям провести консультації з метою вироблення конкретних пропозицій щодо заходів запобігання державному ядерному тероризму, а також виключення загрози навмисного або ненавмисного застосування зброї



проти ядерних установок, призначених для використання в мирних цілях. Ми готові прийняти на себе організацію та координацію відповідних консультацій.

7. Звертаються до світової політичної та наукової спільноти та відповідних наукових фінансових фондів з проханням надати міжнародну технічну та фінансову допомогу та підтримку солідарності для відшкодування збитків, завданих і залишених агресором, включаючи ремонт або заміну інфраструктури, а також відновлення будівель, лабораторії, офіси та технічне обладнання, необхідне для відновлення ядерної безпеки ядерних об'єктів та радіаційного захисту в зоні відчуження.

8. Пропонують створити національний координаційний комітет з керівництвом на рівні Кабінету Міністрів України за участю відповідних органів влади з метою розроблення комплексного плану першочергових заходів з усіх напрямків діяльності по відновленню режиму безпеки на ядерних об'єктах України та негайного його впровадження для ліквідації збитків від військових дій.

9. Звертаються до міжнародної спільноти та світової громадськості із проханням виділення технічної та фінансової допомоги для відновлення та ремонту інфраструктури та передачі технічного обладнання, необхідних для відновлення безпеки ядерних об'єктів.

10. Пропонують продовжити та посилити роль міста Славутича як науково-технічного кластеру з проведення науково дослідницьких робіт на Чорнобильській АЕС, об'єкті "Укриття" та Зоні відчуження за участі усіх зацікавлених сторін, у т.ч. наукових інституцій, органів місцевої та регіональної влади, спеціалізованих підприємств, вищих навчальних закладів.

11. Звертаються із проханням до Уряду України та країн-партнерів про виділення технічної та фінансової допомоги для створення та відновлення втраченої внаслідок війни логістики шляхом запровадження водного та наземного сполучення міста з ключовими у його життєдіяльності локаціями Славутич – Чорнобиль – Київ.

12. Закликають усіх, кого це стосується, забезпечити висвітлення проблемних питань, порушених на конференції, на сторінках науково-практичних журналів, а також оприлюднення матеріалів конференції та її рішень у засобах масової інформації.

Учасники конференції висловлюють подяку організаторам за проведення її на високому науковотехнічному рівні та рекомендували направити звернення та рішення конференції до Верховної Ради України, Кабінету Міністрів України, Адміністрації Президента України, Міністерства енергетики та вугільної промисловості України, Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, Державної інспекції ядерного регулювання України, Національної академії наук України, МАГАТЕ, посольства G7 в Україні, ЗМІ та іншим організаціям та установам.

Прийнято  
28.04.2022

## ВІДКРИТЕ ЗВЕРНЕННЯ

учасників VII Міжнародної конференції «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища»  
INUDECО 2022

27-28 квітня 2022 року, м. Славутич

24 лютого 2022 року російські війська вторглися в Україну. Того ж дня Чорнобильська АЕС та зона відчуження були захоплені російським агресором. Пізніше агресор окупував Запорізьку АЕС, здійснював обстріляти ядерної установки у Харкові, місті з мільйонним населенням. Над діючими АЕС України неодноразово було відзначено прольоти крилатих ракет. Запорізька АЕС зазнала обстрілів танковими снарядами.

Окупація Чорнобильської та Запорізької АЕС призвела до фактичного руйнування систем фізичної ядерної безпеки об'єктів; системи аварійної готовності; відповідальності за ядерні збитки; до порушення системи обліку та контролю ядерних матеріалів, а отже і режиму нерозповсюдження ядерної зброї. Було створено неприпустимі психологічні умови для діяльності персоналу, що підтримує безпеку ядерних установок та пряму загрозу їх життю. Дії держави-агресора, беззмінного члена Ради безпеки ООН, засновника ООН та МАГАТЕ може бути класифіковано не інакше, як ядерний тероризм.

Акти ядерного тероризму здійснені не лише військовими, а й фахівцями, спеціалістами та керівниками ядерної енергетики держави-агресора.

Конференція констатує, що в цій ситуації дії МАГАТЕ виявилися абсолютно недостатніми відносно ситуації, що склалася. Міжнародне агентство з атомної енергії більше двох місяців від початку агресії не наважується заявити про глобальну загрозу ядерній безпеці, про порушення режиму нерозповсюдження ядерної зброї, і навіть не визначило дії держави – агресора актами ядерного тероризму. МАГАТЕ, як одна з ланок системи ООН, порушила власний статут, не зажадала скликання Ради безпеки ООН у зв'язку зі скоєними актами ядерного тероризму та загрозою режиму нерозповсюдження ядерної зброї.

Не менш стриманою була й поведінка інших міжнародних організацій, пов'язаних з використанням ядерної енергії в мирних цілях: Агентства з ядерної енергії (OECD/NEA), Всесвітньої асоціації організацій, які експлуатують атомні електростанції (WANO), Всесвітньої ядерної асоціації (WNA), Асоціація регулюючих органів Західної Європи (WENRA) та ін.

Конференція вважає, що подальша бездіяльність МАГАТЕ, а також інших міжнародних організацій, що представляють інтереси ядерної енергетики є прихованою підтримкою безперервних актів ядерного тероризму та становлять пряму загрозу майбутньому ядерної енергетики.

Конференція зазначає, що терористичні дії держави – агресора і військові дії в Європі, де діють близько 200 блоків АЕС, несуть пряму загрозу важких

ядерних аварій з усіма наслідками для життя і здоров'я населення, навколишнього природного середовища. Ситуація, що складається, може також вплинути на перспективи використання ядерної енергії в мирних цілях, оскільки АЕС та інші ядерні об'єкти мирного призначення не можуть протистояти навмисному або ненавмисному впливу сучасної військової зброї.

Конференція вважає, що в умовах війни (бойового впливу) безпека АЕС не може бути забезпечена, а наслідки такого впливу на життя та здоров'я людей та стан навколишнього природного середовища можуть бути катастрофічними у масштабах континентів, а не окремих країн.

Конференція зазначає, що в умовах війни (бойових дій) АЕС не відповідає та не може відповідати умовам та межах безпеки, які обґрунтовані у звітах з аналізу безпеки, на підставі яких видано ліцензії на їх експлуатацію. Це означає, що АЕС, які знаходяться на території бойових дій або потенційних бойових дій знаходяться поза правовими рамками, що регулюються міжнародними конвенціями (угодами), а отже можна прямо заявляти, що в результаті дій держави-агресора, міжнародний режим ядерної безпеки сьогодні не діє.

Зважаючи на загрозу безпеці об'єктам мирного використання ядерної енергії в мирних цілях, що склалися внаслідок дій агресора, держави – ядерного терориста проти України учасники конференції:

1. Наполягають, щоб генеральний директор і Рада управляючих МАГАТЕ виконали, положення статей III, B.4. та XII.C. Статуту Агентства і зажадали від агресора негайного усунення всіх випадків недотримання вимог міжнародних конвенцій та угод у частині фізичного захисту ядерного матеріалу, повідомили про ці факти всім членам Агентства, а також Раді Безпеки та Генеральній Асамблеї Організації Об'єднаних Націй.

2. Звертаються до міжнародних організацій, пов'язаних з використанням ядерної енергії в мирних цілях та ядерної безпеки (Euroatom, WENRA, WANO, ICRP, OECD/NEA, ENSREG, а також національним органам ядерного регулювання та експлуатуючим організаціям рішуче засудити дії держави – ядерного терориста та вчинити тиск на його структури з метою негайного припинення актів ядерного тероризму, які несуть пряму загрозу безпеці ядерних установок та перспектив розвитку ядерної енергетики.

3. Пропонують органам ядерного регулювання та експлуатуючим організаціям провести консультації з метою вироблення конкретних пропозицій щодо заходів запобігання державному ядерному тероризму, а також виключення загрози навмисного або ненавмисного застосування зброї проти ядерних установок, призначених для використання в мирних цілях. Ми готові прийняти на себе організацію та координацію відповідних консультацій.

Прийнято  
28.04.2022

## Зміст

<i>Hecla J., Knecht K., Vetter K., Haefner A., Pavlovsky R.</i> Advanced 3D contamination mapping in the aftermath of the russian invasion of Chornobyl.....	13
<i>Megumi Sugimoto</i> How to prepare at a National University located 32 km from nuclear power plants after the 2022 Ukrainian War .....	13
<i>Verbelen Ya., Megson-Smith D., Tucker M.-R., Marti P.-G., Conno D.-T., Russell-Pavier F., Holland E., Scott Th.-B.</i> Radiation-resistant sensor fusion instrumentation for remote inspection at Chornobyl nuclear power plant .....	15
<i>Borysenko V., Goranchuk V.</i> A reactivity accident thirty-six years later .....	29
<i>Габелков С. В., Долін В. В., Жиганюк І. В., Зубко О. В., Краснов В. О., Кудлай В. Г., Пархомчук П. Є., Савченко Б. С., Чиколовець С. О.</i> Оптимізація параметрів електрокінетичних процесів в поровому просторі лавоподібних паливовмісних .....	35
<i>Габелков С. В., Жиганюк І. В., Скорбун А. Д.</i> Кількісні оцінки вмісту кристалічних фаз у багатофазних зразках на основі даних рентгенівської дифракції .....	36
<i>Гірка І., Азаренков М., Рудичев В., Рудичев Є.</i> Дослідження ефективності процесів утворення медичних радіоізотопів при опроміненні незбагаченого урану .....	38
<i>Городецький Д. В., Павловський Л. І., Меньшенін Є. А.</i> Зміни поверхневого забруднення зовнішніх поверхонь конструкцій об'єкту «Укриття» у період дослідно-промислової експлуатації комплексу НБК-ОУ .....	40
<i>Деренговський В. В., Максименко А. М., Меньшенін Є. А.</i> Визначення фонових рівнів радіаційних параметрів, що характеризують радіаційно-гігієнічний стан навколишнього та виробничого середовища на майданчику централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива .....	41
<i>Казимиров О. С., Ієвлєв С. М., Чорний Є. В.</i> Загальні підходи до реагування на можливі ядерно та радіаційно небезпечні аварійні ситуації у зв'язку з бойовими діями в Україні .....	44
<i>Коваленко А., Сакаль О.</i> Інструменти стратегічного планування для відновлення територій, постраждалих внаслідок бойових дій .....	47
<i>Ковальчук І. А., Спасьонова Л. М., Закутевський О. І.</i> Сорбційне очищення радіоактивно забруднених вод кислотного- та механоактивованим монтморилонітом .....	50
<i>Круковський П., Склярєнко Д., Дядюшко Є., Кондратенко С., Кузьменко В.</i> Аналіз низького витоку повітря за межі НБК та на ділянці обшивки вентшахти ДСРВ .....	52
<i>Кряжич Ольга</i> Моделювання екологічного стану території за точками-джерелами інформації .....	55
<i>Машиністов В., Балакин В.</i> Технологія переводу радіоактивно забрудненого металу в екологічно безпечний стан з використанням властивості природи до самозахисту.....	58
<i>Одінцов О. О., Паламар Л. А.</i> Форми знаходження урану і радіонуклідів у донних відкладеннях приміщень 001/3 і 012/7 НБК – об'єкт «Укриття».....	63

<b>Одінцов О. О., Хан В. Е.</b> Рідкі радіоактивні відходи в об'єкті «Укриття» - п'ять років після встановлення нового безпечного конфайнменту .....	69
<b>Павловський Л. І., Єгоров В. В., Хоменко Д. О.</b> Характеристика радіаційної обстановки у зонах виконання робіт по демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» .....	74
<b>Polyakova I. O., Stratilat D. P., Maidannyk T. P., Budnyk O.P.</b> Interpretation of radiation-ecological indicators obtained by using of the “NUVIA” integrated automatic system for environmental radiation monitoring and its correlation with data provided by the ukrainian hydrometeorological central audience service of Ukraine for emergency situations .....	78
<b>Prysyazhnyuk A. Ye., Bazyka D. A., Gudzenko N. A., Fuzik M. M., Trotsyuk N. K., Babkina N. G., Khukhrianska O. M., Danevych S. A.</b> Cancer incidence in population of Ukraine affected by radiation in the remote period after the chornobyl accident.....	89
<b>Розко А. М., Федоренко Ю. Г., Злобенко Б. П.</b> Цементування імітатів РОРВ геополімерними зв'язуючими .....	91
<b>Рубан Ю., Сіненко Б., Паренюк О.</b> Перспективи використання ARG (alternate reality game) та RPG (role-playing game) для відпрацювання нестандартних ситуацій на об'єктах ядерно-паливного циклу .....	93
<b>Sinenko B., Ruban Yu., Pareniuk O., Gudkov I.</b> Chornobyl exclusion zone's contaminated territory as a terrestrial analogue of Mars.....	94
<b>Скітер І., Савельєв М., Деренговський В., Дорошенко А.</b> Структура і основні принципи реалізації підсистеми аналізу щільності потоку нейтронів від контрольованих паливовмісних матеріалів .....	97
<b>Склярєнко Д., Круковський П., Дядюшко Є.</b> Модель вітрового обтікання та розподілу тисків на поверхнях нового безпечного конфайнмента ЧАЕС .....	99
<b>Сосонна Н., Панасюк М., Коваленко І.</b> Постійно діюча математична модель фільтраційних та міграційних умов міжріччя рр. Прип'ять – Уж Чорнобильської зони відчуження.....	102
<b>Талерко М., Лев Т., Носовський А.</b> Оцінка радіоактивного забруднення атмосфери внаслідок лісових пожеж в Зоні відчуження в період з 11 по 31 березня 2022 року.....	108
<b>Шинкаренко В., Талерко М., Кашипур В., Свирид О.</b> До питання про основні напрямки міграції радіонуклідів в зоні ЧАЕС .....	116

# ADVANCED 3D CONTAMINATION MAPPING IN THE AFTERMATH OF THE RUSSIAN INVASION OF CHORNOBYL

*Jake Hecla<sup>1</sup>, Kalie Knecht<sup>1</sup>, Kai Vetter<sup>1,2</sup>, Andrew Haefner<sup>2</sup>, Ryan Pavlovsky<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Department of Nuclear Engineering, University of California Berkeley,  
Berkeley, CA 94720, USA

<sup>2</sup>Applied Nuclear Physics, Lawrence Berkeley National Laboratory,  
Berkeley, CA 94720, USA

**Abstract:** The Russian invasion of Chernobyl has generated wide-ranging radiological problems and introduced myriad hazards to the Exclusion Zone. Surveys of the changed radiological environment will require novel techniques due to the combined radiation and explosive hazards now present at the site. Detector platforms developed at Lawrence Berkeley National Lab (LBNL) which use a 3D radiation mapping technique known as “scene data fusion” (SDF) may provide a means of rapidly creating surveys without risk to personnel. These advanced radiation sensing platforms employ sensor fusion methods which integrate LIDAR, camera and radiation interaction data to develop rich, three-dimensional maps of radiological environments which are easily interpreted and highly granular. Critically, these systems may be deployed using a wide variety of autonomous and remotely-controlled systems, including small drones. This mapping and localization capability has been previously deployed at Chernobyl, and has proven its utility to assess radiological contamination and to guide cleanup activities at a wide variety of sites. In this presentation, we show a number of data products from Chernobyl that demonstrate the capabilities of these systems and discuss the potential impact of adopting such measurement systems for work at the site.

**Keywords:** Scene-data-fusion, cadmium zinc telluride, LIDAR, sensor fusion, gamma ray spectroscopy, gamma-ray imaging

## HOW TO PREPARE AT A NATIONAL UNIVERSITY LOCATED 32 KM FROM NUCLEAR POWER PLANTS AFTER THE 2022 UKRAINIAN WAR

*Megumi Sugimoto (Ph.D.)*

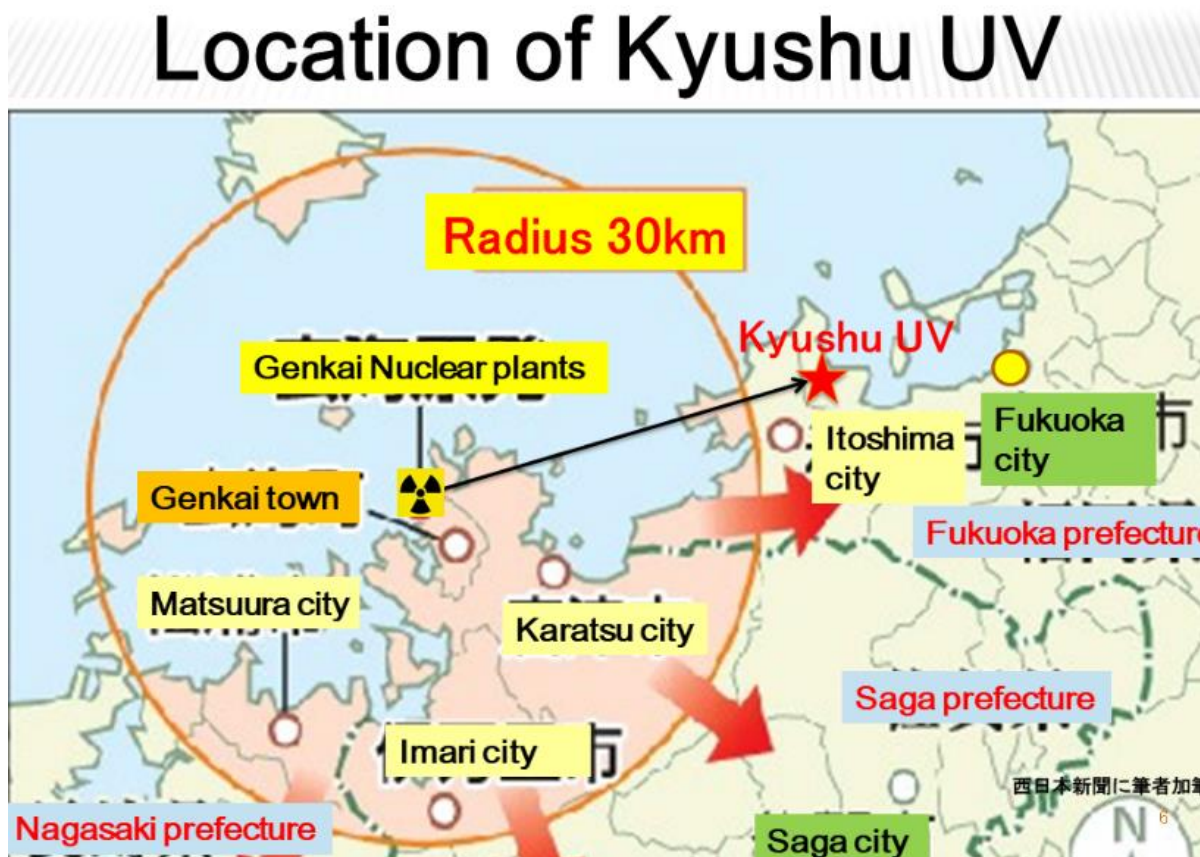
Associate professor in Kyushu University, Japan  
Email: sugimoto.megumi.320 [at] m.kyushu-u.ac.jp

The 2011 Great east Japan earthquake tsunami caused the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Japan once stopped all nuclear power plants in 2011, reviewed various standards for the risk of natural disasters to nuclear power plants, and restarted from nuclear power plants that are strengthened. Kyushu University, one of the oldest national University in Japan is located 32 km from Genkai nuclear power plants have restarted. Kyushu University is basically located on the leeward

side of the Genkai nuclear power plants. Even Fukushima University is located around 75km from Fuku-ichi. Kyushu University is one of the most nearest University from active nuclear plants in the world.

Distribution of medicines of potassium iodine beforehand is left to the discretion of each municipality in Japan. Most students in Kyushu University live in Fukuoka city and Itoshima city. Itoshima city has distributed medicines of potassium iodine to the citizens in advance in preparation for nuclear accident. Students who do not start living in the year when medicines of potassium iodine in Itoshima City expires do not have the opportunity to receive medicines of potassium iodine. Kyushu University has not the distributed medicines to students beforehand. Most students have not prepared nuclear accidents nor owed medicines of potassium iodine by themselves.

As in the case of the medicines of iodine, countermeasures have been taken against nuclear accidents in Japan, but there are omissions in various aspects. Therefore students in Kyushu University are not protected. Few students enter University knowing that it is close to the nuclear power plant in the first place. It is necessary to strengthen measures not only for students coming from outside but also for vulnerable people in local area near nuclear plants in Japan under conflicts after the 2022 Ukrainian War. Nuclear power plants have not prepared for the war in Japan. Risk management of nuclear plants has reached new important turning point 11 years after the Great East Japan Earthquake in Japan. Japan has learned much from Ukraine. Japan must continue to learn a lot about nuclear accidents and defense from Ukraine.



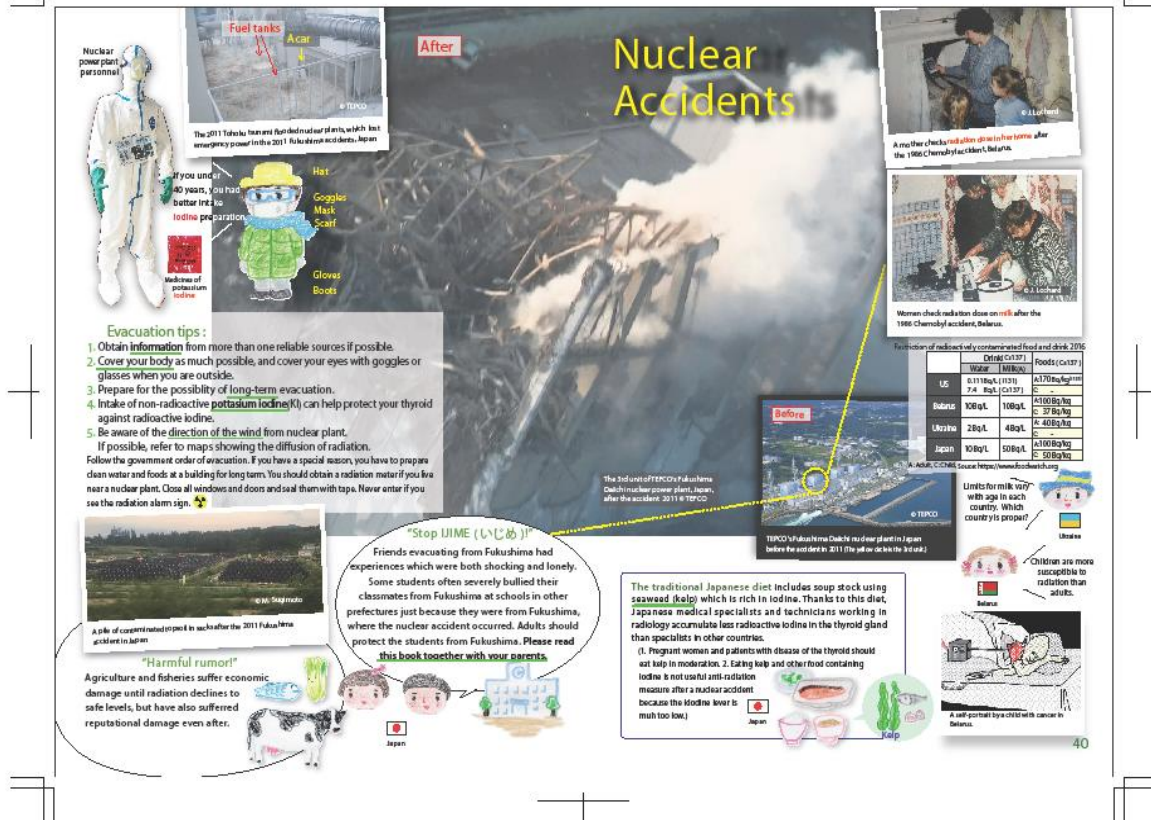


Fig. 1. Evacuation manual of nuclear accidents

## RADIATION-RESISTANT SENSOR FUSION INSTRUMENTATION FOR REMOTE INSPECTION AT CHORNOBYL NUCLEAR POWER PLANT

*Yannick Verbelen, David Megson-Smith, Matthew Ryan Tucker, Peter G. Marti, Dean T. Conno, Freddie Russell-Pavier, Erin Holland, Thomas B. Scott*

Interface Analysis Centre, University of Bristol, BS1 8TL Bristol, United Kingdom

**Abstract:** The hazardous nature of a radioactive environment, such as a nuclear power plant or spent nuclear fuel reprocessing facility, means that humans inspecting these environments are undesirable because of the resulting radiation dose from time spent in proximity to radiation sources. Dedicated inspection instruments can provide an alternative that removes humans from harmful areas entirely, or significantly reduces the time spent in a hazardous location to deploy the instrument. The more data can be collected during a single deployment, the more favourable its deployment trade-off becomes. The ‘YanDavos’ series of nuclear inspection instruments developed at the University of Bristol (UK) are sensor fusion devices, capable of recording not only radiation information but simultaneously creating 3D models of the environment onto which the radiation data can be overlain. The second iteration of the instrument, ‘YanDavos II’, is the first to feature radiation hardening measures



incorporated from the design phase. YanDavos II was deployed, and its performance evaluated, in the Chernobyl Exclusion Zone (ChEZ) and inside the Chernobyl Nuclear Power Plant (ChNPP) in 2021. This work details the radiation resistance strategies applied to YanDavos II, and also documents the experiences gained in the field while deploying the instrument in active environments.

## **1. Introduction**

The presence of ionising radiation and its harmful effects on living beings limits the frequency and detail of manual inspections in radioactive environments [1]. Similar restrictions apply to disaster response scenarios and other beyond-design-basis events. Such events can often leave a nuclear site and the surrounding environment in an uncertain state. This in turn complicates interventions to contain the, often rapidly evolving, situation. The accident which occurred on the evening of 26 April 1986 at the Vladimir Lenin Nuclear Power Plant, also known as the Chernobyl Nuclear Power Plant (ChNPP) is an example of a design-basis accident (DBA). When the effects of known design deficiencies were exacerbated by multiple procedural violations and operator errors the situation rapidly developed into a non-design-basis event. When such an event occurs, it is paramount that the radiological situation is characterised as quickly as possible. Collecting information on the presence and spatial distribution of radionuclides, helps to prioritise containment and remediation efforts. However, sending humans into environments with unknown radiological conditions is hazardous; particularly in situations where large radiological variations create localised “hot spots”. Accidental exposure to such unidentified “hot spots” could result in radiation doses that exceed safe limits [2]. Thus, robotic interventions are preferable as remotely operated inspections negate the need to deploy humans into potentially hazardous environments. The development of robotic platforms explicitly designed for remote exploration and remote inspection of radioactive environments has been the objective of the National Centre for Nuclear.

Robotics (NCNR) in the UK, and the Robots and Artificial Intelligence for Nuclear Applications (RAIN) collaborative research initiative (2018 – 2022). A variety of inspection systems were developed. These included fixed-wing and multi-rotor unmanned aerial vehicles (UAVs) for aerial radiation mapping [2,3], underwater remotely operated vehicles (ROVs) [4], and a comprehensive suite of wheeled and quadruped land-based robots [5,6]. Examples of the latter included a Boston Dynamics’ ‘SPOT’ robot, a smaller but more agile wheeled Leo Rover and a Spider robot. These were equipped with various radiation detectors including gamma spectrometers and neutron detectors [6]. As such systems continue to be improved with augmented detection capabilities, the complexity of their electronics also increases. This in turn increases their susceptibility to radiation induced damage, particularly in designs that have numerous single points of failure.

Concerns about radiation tolerance of robotic system has been a barrier to their deployment in high radiation environments [7]. Work in the 1990s focused on evaluating the radiation tolerance of individual components such as CCD cameras, which were found to be generally limited to 10 R/h [8]. At the same time technologies with known radiation tolerance, such as video cameras based on Russian vacuum

tubes, are now largely obsolete and difficult to source. The result is that most deployment platforms, including UAVs, ROVs, and ground-based exploration and inspection vehicles, are only partially characterised for radiation tolerance, or not at all. The high cost of electronic sensors and control systems is prohibitive for large scale destructive testing, and only incidental data hints at vulnerabilities in specific circuit designs, such as power supply circuits [9,10]. This not only reduces their usefulness in a radiation environment, it also limits their deployment scope to relatively benign use-cases. If a robotic solution for nuclear inspections is devised with radiation hardening as an afterthought, the result is invariably sub-optimal.

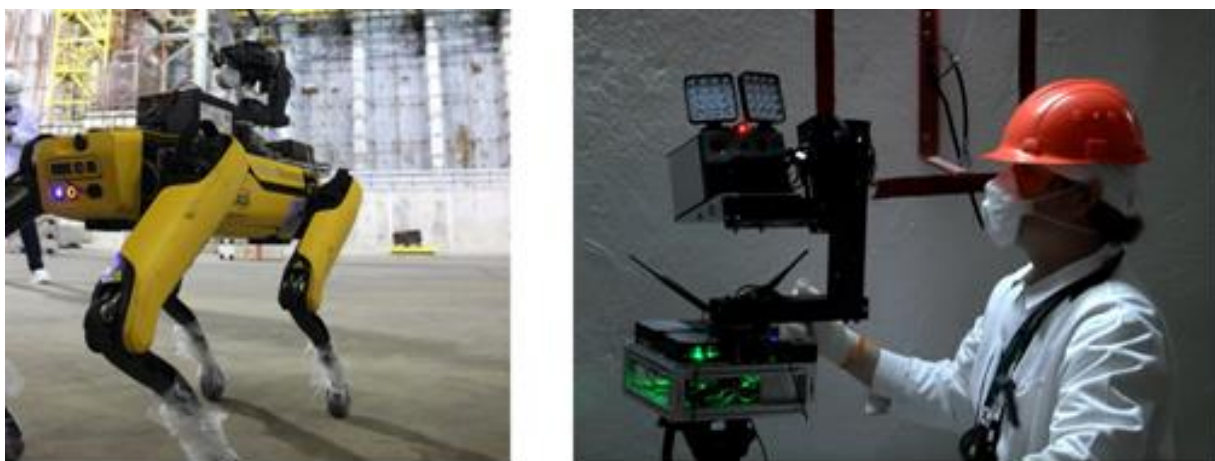


Fig. 1. YanDavos I deployed on Boston Dynamics' SPOT robot inside the NSC, 2020 (left) and YanDavos II deployed inside Unit 4 Control Room on a tripod, 2021 (right).

Mitigation strategies in such scenarios are usually limited to adding lead or tungsten shielding, which adds excessive weight to the design [11] and has reduced effectiveness for higher energy gamma radiation. Reliance on commercial-off-the-shelf (COTS) components that are “black boxes” and have a poorly understood radiation tolerance, limits the design freedom for proactive radiation hardening. With the inception of the YanDavos series of nuclear inspection instruments, a radically different approach was adopted. YanDavos systems have become increasingly complex with every iteration, because they are designed as multi-role inspection systems intended for a wide range of stand-off inspection use-cases, including but not limited to nuclear inspections. YanDavos is likely the best known example of a nuclear sensor fusion instrument, featuring sensing capabilities such as LiDAR, gamma spectrometers, visual and thermal cameras and environmental sensors. It is equipped with on-board laser targeting, lighting for poorly illuminated environments, and both wired and wireless communication capabilities for true autonomous and remote operation. Experiences deploying YanDavos I and YanDavos II in real-world nuclear sites, including at ChNPP, have illustrated the importance of proactive radiation impact mitigation strategies from the earliest development stages. A unique research and development program was conceived for YanDavos, that focuses on short development cycles, fast design iterations, and closed-loop feedback for experiences gained through repeated field deployments in hazardous environments. Feedback from staff at ChNPP has proven invaluable to improve YanDavos, with enhancements to capabilities and user

interface as the most visible improvements. This paper reports on the less visible improvements to YanDavos II which relate to radiation hardening, as well as experiences gained deploying YanDavos II at ChNPP in September 2021. [12]

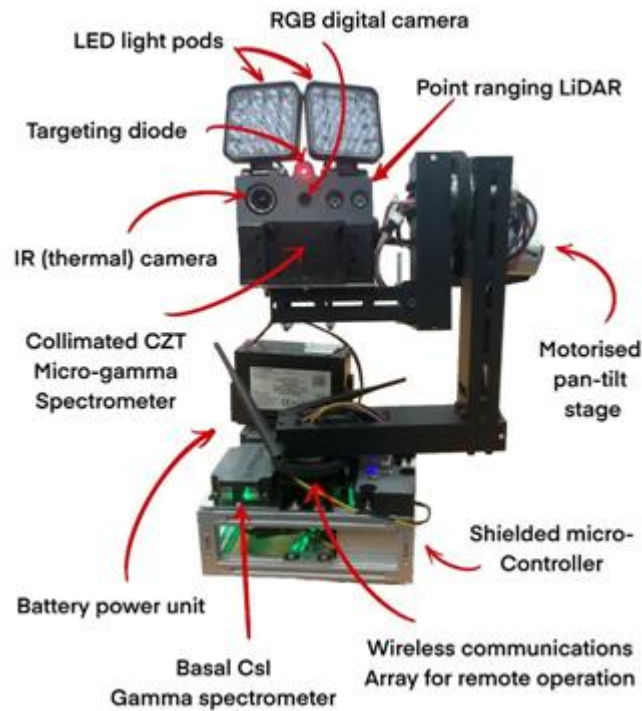


Fig. 2. YanDavos II with some of its visible components annotated.

## 2. System Architecture

YanDavos is a sensor fusion system designed for remote nuclear inspections. The core design principal was to combine multiple sensors into a single instrument to maximise deployment potential and ease post-deployment data processing. One of the challenges routinely faced during data processing is the difficulty of synchronising data sets in time and space, i.e. overlaying coordinates and time stamps to combine data sets produced by different sensors. The integrated approach of a sensor fusion instrument such as YanDavos eliminates this complication by combining data streams from different sensors in real-time. This eliminates the most time-consuming post-deployment data processing work. It is particularly important in the context of nuclear inspections, where indoor deployments may block traditional positioning techniques such as GNSS, and thick walls or metal structures can interfere with ToF or TDoA type positioning.

Designed as a modular sensor fusion instrument, YanDavos consists of a static base containing most of the electrical and electronic systems. A pan-tilt unit (PTU) can aim and scan a detector head with a horizontal range of  $360^\circ$  and  $-75^\circ$  to  $90^\circ$  in the vertical plane. The detector head can therefore be aimed at any point in a half spherical space for inspections. In most practical use cases, the surface of interest covers a larger area, and YanDavos can be configured accordingly.

YanDavos I was conceptually designed around a collimated gamma spectrometer with a  $1 \text{ cm}^3$  Cadmium-Zinc-Telluride (CZT) crystal based on the CC-RIAS design [11]. The collimated gamma spectrometer was complemented by a

point LiDAR and an Intel RealSense camera, with software running on a Raspberry Pi 3B+. It was observed during deployments in 2020 that the collimation was insufficient to capture high resolution data in environments with elevated background radiation. In YanDavos II, this was resolved by adding additional collimation and shielding to the gamma spectrometer. In doing so the additional weight necessitated a larger and more powerful PTU. Figure 1 shows a comparison of both instrument iterations. Further to this, a FLIR A35SC thermal camera was added together with a cross target pointer and lighting for low lit environments, and the RealSense was swapped for a Sony IMX291 based CMOS camera optimised for low-light conditions. A 16 cm<sup>3</sup> CsI(Tl) scintillator detector was also added on the base of the PTU to measure the background radiation at the point of deployment. This reference reading could then be subtracted from the CZT detector measurements. Figure 2 shows some of the most important components of YanDavos II system. A block diagram of YanDavos II is shown in Figure 3, with components for which radiation tolerance measures were put in place highlighted in blue.

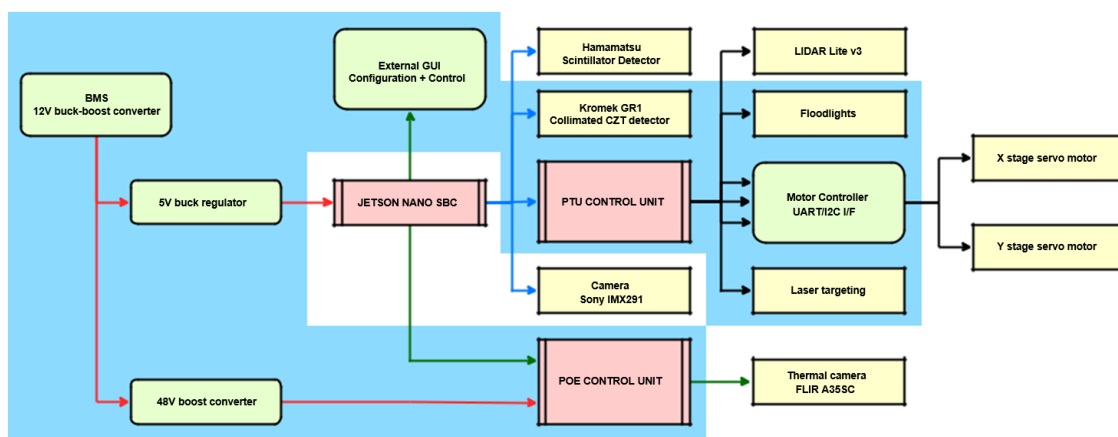


Fig. 3. Functional block diagram of the YanDavos II nuclear inspection instrument. Blue areas cover components for which radiation tolerance measures have been put in place. Red lines: power; for data communication: green lines: UDP; blue lines: USB; black lines: UART, I2C, or direct control.

### 3. Radiation Tolerance

As evident from the block diagram in Figure 3, YanDavos II is an instrument with a relatively complex system design. It features multiple power supply systems, processing and control systems, sensors, and actuators. However, the instrument, can only be as radiation tolerant as its weakest building block. That means that radiation resistance measures must be implemented for each element in the block diagram. Whereas this is possible in theory, the engineering reality is entirely different. For example, designing a radiation tolerant thermal camera or LiDAR may be theoretically feasible, but the development time and costs were prohibitive in the scope of the project. Instead, the approach applied to YanDavos II is twofold. Firstly, focus on radiation hardening components where doing so is relatively straightforward such as by circuit design and/or component selection. Secondly, implement control and mitigation strategies to deal with radiation induced failures in components where radiation hardening is not possible. This approach seeks to identify or anticipate failures and resolve them by attempting to restart of the failed

component. Alternatively, isolating the failed component from the rest of the system in a controlled and safe manner (a so-called “fail safe” strategy) may be preferable. These are effective measures against single event upsets.

When designing for radiation tolerance, two separate radiation induced effects should be considered. Firstly, cumulative effects that are proportional to the total ionising dose (TID). These cause lattice damage which changes semiconductor properties over time. Secondly, single event effects (SEE) must be considered. These are transitional and cause prompt ionisation, inducing noise and charge, and an instant change semiconductor properties. The best known example for both effects is seen within CCD cameras. The noise is a result of SEE, and a gradual distortion of the image as a result of prolonged exposure is due to TID. In complex circuits, SEE can induce a variety of problems, most often in semiconductors. The five SEE that were considered for YanDavos II radiation tolerance are:

1. Single-event transients (SET): charge deposited by a particle creating a spurious signal. These effects induce noise spikes in analog signals and lead to deterioration of data or erratic behaviour of analog control loops.

2. Single-event upsets (SEU): a particle interaction flipping a memory state or bit. These effects cause corruption of data in memory, or when occurring in program memory, can send the instruction pointer to an unpredictable or non-existing address, therefore crashing the code. When occurring in data memory, they can be detected with parity checks.

3. Single-event latch-ups (SEL): a particle interaction causing a conductive path that shorts source to substrate. Latch-ups are equivalent to thyristor operation, and require a full power cycle of the supply voltage to reset. If not protected against, SEL can cause power circuitry to burn out.

4. Single-event induced burn-out (SEB): a particle interaction causing the drain-source voltage to exceed the breakdown threshold, destroying the transistor.

5. Single-event gate rupture (SER): a particle interaction induced breakdown of MOS or EEPROM gates when a high voltage is applied. Causes permanent damage, and if the effect is transient, requires a full power cycle.

SET and SEU largely affect software controlled functions, and are dealt with accordingly. To design for SET immunity, almost all circuits in YanDavos II are digital, which are immune to noise by design. Analog feedback loops, such as those in the servo motor controller, were kept as short as possible. There are no analog signals in YanDavos I or II that are carried between functional blocks. Where analog signals susceptible to noise are inevitable, such as inside the CZT detector, they are shielded. Termination resistors with a 50  $\Omega$  characteristic impedance are used in conjunction with dedicated line drivers to keep the line impedance low. This reduces the voltage induced by SET which is proportional to the signal amplitude.

Although less susceptible to SET, digital systems are very sensitive to SEU. This applies particularly to volatile memory and registers with low bias voltage. There are two parallel strategies applied to mitigate SET in YanDavos II depending on where the event occurs. If occurring in data signals, parity checking is employed to detect whether data is corrupted by SET. This has not proven to be a significant issue during deployments. However, if the situation were to arise in the future, then a RAID

memory configuration can be set up to automatically catch SET induced memory corruption. On the other hand, if SET occur in program memory, it is likely to freeze the software running. This is because instructions become corrupted, or non-existing addresses are referenced. In the micro-controllers (MCU), this problem is caught by a built-in watchdog timer. As usual, the MCU watchdog timer is periodically reset by the main control loop in software. If the program memory gets corrupted, the watchdog timer expires and triggers a full reload of volatile memory from flash memory (erasing the fault) and initiating a restart of the software. The drawback of this approach is that any volatile data as well as the state of execution is lost, so additional code was added to save state in EEPROM memory to avoid entering an unknown state after a full reset. The YanDavos topology is a modular design with multiple physical processor cores that do not share data or program memory, SEE affecting one microprocessor or microcontroller do not affect any of the others.

In contrast to SET and SEU, other SEE are not usually transitional, and are likely to cause permanent damage if not handled properly. Power management circuits designed with high current handling capabilities are particularly prone to permanent damage caused by latch-up events that last longer than a few hundred milliseconds. Discussed below are the radiation hardening strategies applied to the YanDavos II design to handle SEL, SEB, SER, and TID in some of the most critical components.



Fig. 4. YanDavos II static deployments on a tripod, as seen inside the Unit 4 Control Room (left) and while imaging the western wall of the Shelter inside the NSC (right).

### 3.1. Radiation Hardening Strategies

There are 8 principal radiation resistance strategies that can be applied to an instrument such as

YanDavos or its constituent components:

1. **Shielding:** the addition of a dense shielding material such as Pb or W to reduce the dose rate for sensitive components.

The drawback of this strategy is that it adds bulk material to the system which increases its weight significantly, and the effectiveness of shielding drops off with higher gamma energies.

2. **Cross section reduction:** size reduction of critical components to reduce the radiation flux they are exposed to.

This strategy is ineffective for most CMOS circuits, where miniaturisation results in gamma-induced conduction across metal oxide barriers, which in turn induces latch-ups.

3. **Increased distance:** takes advantage of geometric dilution, with radiation flux dropping off with the square of the distance to the source.

4. **Decreased exposure time:** reduces total dose, and therefore the appearance of TID induced damage effects, by keeping the exposure time of components to the radiation source as short as possible.

5. **Circuit tolerance:** modification of circuit designs, such as CMOS circuits, that makes them intrinsically more radiation tolerant. For example, having 2 MOSFETs in series with each other prevents conduction from taking place if either of the MOSFETs is triggered by a single event upset.

6. **Error correction:** implementing parity checking or other fault detection and correction strategies in software controlled circuits.

7. **Redundancy:** adding back-up circuits or systems with automatic hand-over if one of them fails. Redundancy can be used effectively in conjunction with error correction.

8. **Radiation resistant components:** the use of critical components that have proven radiation tolerance, using larger semiconductor processes or radiation tolerant semiconductor types such as SiC.

Many components rated for military or aerospace applications have higher radiation resistance ratings, but often prove to be very costly/

In each of the blocks in Figure 3, one or more of these strategies were combined to improve radiation resistance locally.

### 3.2. Power Supply Circuits

Power supply circuits are essential to YanDavos instruments because sub-systems have varying individual power and voltage requirements. It is the task of the power management modules to supply power at the correct voltage levels, and within a specified ripple margin, to each of the functional sub systems of YanDavos. Voltage levels range from 3.3 V for microprocessors to 48 V for the power-over-ethernet adapter driving the FLIR A35SC thermal camera. At the same time, YanDavos must be able to accept a wide input voltage range from  $\approx 10$  V when running from a nearly discharged LiFePO<sub>4</sub> battery, all the way to 59 V when running directly from a Boston Dynamics' SPOT robot supply. As YanDavos' both servo motors and flood lights all require a 12 V power rail, a nominal voltage of 12 V was selected for YanDavos II. With an input voltage that can be higher or lower than the target voltage rail, a buck-boost topology is required for the main DC/DC converter. As the most critical power supply module, substantial attention was given to radiation tolerance in the design phase of the DC/DC converter. The main DC/DC converter design combines three of radiation hardening strategies elaborated above: circuit level tolerance, radiation resistant components, and cross section reduction.

As the output voltage can be higher or lower than the DC/DC converter's input voltage, an active DC/DC converter topology (buck/boost) is needed, which eliminates the possibility of a linear regulator (LDO) which offers improved radiation resistance. As a minimum, a buck-boost converter requires an oscillator, sawtooth generator, and comparator for duty cycle modulation. Implementing this functionality yields a high transistor count, and therefore increases the chance of radiation induced failures. To

reduce the risk, a highly integrated DC/DC controller of type LT8210 was selected, which combines the functional components onto a single die. The circuit area is small, which takes advantage of reduced cross section of the silicon to improve radiation resistance. Power switches, unfortunately, are physically too large to benefit from cross section reduction because of their expected current handling capabilities. In YanDavos II, the main DC/DC converter is rated to 100 W at a fixed output voltage of 12 V, which is equivalent to a continuous output current in excess of 8 A. The switching current through the inductor is about twice this value, and with a 20% safety margin, the switches were specified to handle 25 A switching current. Their die is about 4 mm<sup>2</sup>, which is a substantial cross section for gamma radiation. To mitigate the risk, the entire design was laid out exclusively with N-channel MOSFETs (more radiation tolerant than their P-channel counterparts because the absence of a P-well reduces the latch-up risk to substrate). In addition, silicon carbide (SiC) MOSFETs were selected, which have an improved radiation tolerance in comparison to GaN power MOSFETs. SiC MOSFETs are the most radiation tolerant option of any MOSFET type that is not specifically marketed as rad-hard, the latter being reserved for aerospace applications and suffering from supply chain issues as well as excessively high cost.

Lastly, circuit level tolerance has been incorporated from the design phase. This includes double MOS switches at critical positions, which ensures 2 switches must be actuated simultaneously, thus preventing spurious activation of either switch to cause undesirable currents to flow. As it is statistically unlikely for both MOS switches to simultaneously experience a SEE, this strategy improves radiation immunity. However, it does not mitigate against accumulative effects, which change the properties of the MOSFETs as radiation damage accumulates inside the semiconductor. Such damage changes conduction behaviour, which in turn translates to a change in current flow in either the ON or OFF configuration (charge build-up causes N-MOSFETs to be turned on easier, and P-MOSFETs turned on harder, respectively). The current is measured at 2 positions in the DC/DC converter, using a Kelvin connection across 2 shunt resistors with a value of 2 mΩ each. The switching MOSFETs are configured in a classic H-bridge topology with the single inductor as load between the 2 half bridges. If either of the 4 MOSFETs drifts, the resulting imbalance between primary and secondary side of the bridge will cause a change in voltage drop over the shunt resistors, which is measured by the controller. If the drift exceeds a preconfigured level, which translates to a certain amount of radiation damage, the MOSFET is turned off. If the drift causes positive feedback, for example one of the N-MOSFETs that can no longer be turned off, an additional control MOSFET is actuated to turn off the power. At any time, there are always at least 3 MOSFETs between a positive power rail and ground, which means two can fail in a shorted state without causing a short circuit of the input supply. Even if this happens, an input fuse trips, disconnecting the DC/DC converter from the power input (such as a battery) entirely, and failing in a safe manner. The DC/DC converter circuit is an open source design, and has been simulated using LTSpice to verify correct behaviour. Power and efficiency measurements were made to characterise the electrical performance before deployment [13].



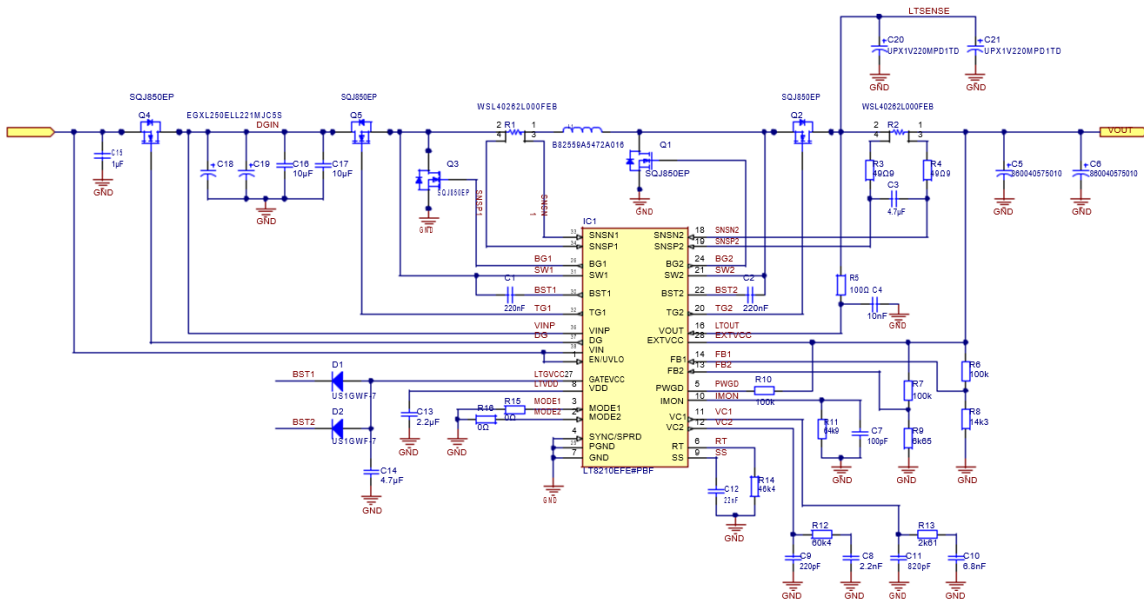


Fig. 5. Schematic diagram of the main buck-boost DC/DC converter as implemented in YanDavos II, featuring radiation resistant elements including redundancy and rad-hard SiC MOSFETs. [13]

In YanDavos II, all of the power supply and power management circuits are bespoke designs, as “black boxes” should be avoided as much as possible for mission critical components. The main DC/DC converter, as discussed above, uses a direct coupling between input and output due to the high power and efficiency requirements. Designed to be operated without active cooling (to avoid attracting dust in a radioactive environment), excess heat is an important factor to be considered during the design process. Minimising the inductance is the method of choice. For secondary supply rails, for example the 5 V and 12 V rails, where efficiency is less critical because the absolute power transfer is lower, direct coupling is better avoided. A capacitive or inductive coupling between input and output is instead preferred because both are electrical open circuits at DC, which means failure of the active components in a DC/DC converter automatically decouples the output power rail from the input rail. For buck converters, the SEPIC topology is the most commonly implemented, using a capacitor for coupling. At high currents, the switching losses in ceramic capacitors quickly become excessive, but at relatively low currents below 1 A, as is typical for electronic circuits, it is a favourable topology.

For the 48 V boost converter for the PoE adapter feeding power into the thermal camera, a flyback topology was selected. As with a capacitor, transformers are open circuits for DC, so any failure of primary side circuitry passively decouples the thermal camera from the battery. Pulse transformers are particularly effective at a fixed duty cycle, when the ratio between input and output voltage is constant. For the PoE boost converter, this is a ratio of exactly 1:4 (stepping up from 12 V to 48 V) which means it can be implemented with a compact transformer and minimal external circuitry. Secondary side sensing with optocouplers is avoided because optocouplers, like all other optical components, are particularly prone to radiation damage. Figure 6 shows the circuit board for active PoE injector, with transformer as part of the voltage multiplier seen on the left.



Fig. 6. Power over Ethernet (PoE) injector designed for YanDavos II, with the 48 V step-up converter with isolation transformer to the left, and the Ethernet controller to the right.

### 3.3. Sensors

As a sensor fusion instrument, YanDavos II features a number of high-end sensors and associated equipment. Many of these are highly sophisticated, such as the LiDAR and thermal camera, and the result of lengthy development processes resulting in proprietary technology. Replicating functionality in a radiation tolerant alternative would require equally length development processes at excessive costs, which are prohibitive. Instead, the solution chosen for YanDavos II was to use commercial sensors and apply external radiation tolerance improvement strategies to them. This was done to the collimated CZT detector and the LiDAR.

The collimated CZT gamma spectrometer is based on a Kromek GR1 detector. It features sensitive analog circuits that are prone to SEU and SET. The applied solution was to add extra shielding to the detector, which also improves its collimation. As part of the YanDavos II sensor head design, additional lead shielding was added to surround the GR1 unit, with a total of 18 mm of lead shielding added on every side. In the front of the detector, the CZT crystal was exposed by a pinhole. This was achieved using composite material consisting of lead sheets embedded in structural plastic parts which were 3D printed in PLA. This form of additive manufacturing, which is gaining popularity in the nuclear industry [14], combines the excellent shielding properties of lead (but low mechanical stiffness) with the structural flexibility of plastic parts. The manufacturing process of these bespoke shielding parts is shown in Figure 7.



Fig. 7. 3D printing lead-containing composite materials for shielding of sensitive components in YanDavos II

The LiDAR is very sensitive to radiation, because SET cause spurious signals in its photodiode which are interpreted by the LiDAR logic as laser return signals. Occasionally, the LiDAR was found to lock-up during tests, malfunction, and/or stop communicating, and additional circuitry was implemented to catch and resolve this problem when it occurs. Firstly, a load switch was added in line with the LiDAR's 5 V power rail, which allows it to be power cycled. The LiDAR was assigned its own linear voltage regulator (LDO) which physically decouples its power rail from other devices in the sensor head of YanDavos II. Secondly, a hardware watchdog timer was implemented such that, when allowed to expire, the LiDAR is automatically power cycled.

Microcontrollers are inherently prone to radiation damage because of the large number of transistors they contain, which increases the chance of radiation induced effects happening in microcontrollers. SET and SEU can largely be resolved in software, although cumulative radiation damage cannot. Because of the low cost of modern microcontrollers, the integrated circuit package was mounted in a socket, which allows it to be replaced between deployments. Swapping critical components to "reset" cumulative radiation damage was considered a cost-effective strategy during the design phase of YanDavos II. Previous research has shown that AVR type microcontrollers of the same family as those in YanDavos II, can withstand radiation doses in excess of 635 Gy [10].

### 3.4. Control Circuits

Radiation hardening strategies are paramount for control circuits responsible for critical functionality. Software and hardware watchdog timers, as discussed above, are effective strategies to monitor software and trigger resets in case of single event induced upsets or latch-ups. When control circuits are responsible for driving actuators, additional fail safe measures must be put in place. The PTU in YanDavos is controlled by two integrated servo motors, which are commercial components and therefore have unknown radiation tolerance. Aside from a built-in hard "stop" for the moving mechanism, redundancy was built in on different levels to drive the servo motors. The servo motors can take control instructions through two serial interfaces, UART and I2C, but not at the same time. A switch matrix was implemented with discrete logic chips to enable UART and I2C control signals to be switched between the microcontroller and either of the two servo motors. If either interface is affected by radiation damage, the other can be switched in place and take over control nearly seamlessly. Both actuation methods were implemented in software on a microcontroller.

The most critical control circuit for which no radiation hardening strategy could be devised is the SBC for control and data collection. It is based on a Jetson Nano, a commercial device with unknown radiation tolerance characteristics. Mounting the Jetson Nano horizontally in the YanDavos II base helps to reduce its cross-section. As with other software controlled systems in YanDavos II, the Jetson Nano runs an internal watchdog timer to reset it in case of SEE, in addition, its software is running from an SD card which can be easily swapped as an inexpensive replacement to "reset" cumulative damage of the memory between deployments/



Fig. 8. YanDavos II being transported inside the NSC by ChNPP staff (left) and as seen during a scan from a suspended walkway (right).

#### 4. ChNPP Deployment Experiences

Overall, the electronic systems on YanDavos II passed a 2-week series of deployments in the Chornobyl Exclusion Zone (ChEZ) and inside ChNPP, organised in September 2021 to test the YanDavos II in a real-world nuclear environment. YanDavos was deployed in indoor and outdoor environments with varying levels of radiation, and was demonstrate to operate in all weather conditions including pouring rain. No permanent circuit level failures, as a result of radiation induced damage or otherwise, were observed. However, the maximum dose rate was estimated to be no higher than 2 mSv/h, and total dose lower than 1 mSv. Most of this dose was accumulated scanning two tanks at the Buryiakivka Radioactive Waste Disposal Site, and not inside ChNPP.

Nonetheless, several points of improvement were identified.

Firstly, it was found that the instrument in its entirety is too heavy for manual deployment and too bulky to be easily manouvrable through narrow corridors at ChNPP. Although the original weight limit of 12 kg was imposed by the payload carrying capacity of SPOT, one of the objectives for YanDavos III is to reduce the weight to about half of that. A new bespoke design for the PTU and counterbalanced detector head should make this possible. The flexibility to mount the instrument on SPOT, tripod, or upside down on a gantry, will be preserved.

Secondly, colleagues at ChNPP kindly pointed out that the user interface, which relies on a touch screen based tablet, is not optimised for a hazardous environment, and gloves that are part of protective equipment interfere with the touch screen interface. The conclusion is that a simpler control interface with tactile buttons and/or joystick is needed, which can function as a parallel interface.

Finally, radiation effects were observed with some of the commercial sensor components integrated into YanDavos II, most notably the Kromek GR1 CZT detector which for currently still unknown reasons refuses to initialise properly in a high radiation environment. This design flaw only surfaced in a high radiation environment and was discovered thanks to the opportunity provided by ChNPP to test YanDavos II on site. This software issue has led to the loss of several data sets during deployments in the ChEZ and inside ChNPP. Design work is currently underway to devise USB control circuits capable of resetting USB devices including the Kromek GR1 from a digital controller with a remote control signal.

#### 5. Conclusions

The design of YanDavos II features the first serious engineering effort to integrate radiation hardening features into a nuclear sensor fusion instrument from the ground up,

as opposed to adding it as an afterthought before deployment in active environments. Despite its fast development cycle, the experiences with the bespoke power supply, power management, and control circuits designed specifically for YanDavos II have been positive. Radiation induced erratic behaviour was observed with commercial, off-the-shelf components integrated into YanDavos II, most notably the Kromek GR1 CZT detector. In contrast, the components that were explicitly designed with radiation hardening in mind, proved to display consistent behaviour regardless of radiation levels or weather conditions they were exposed to. No power supply failures were observed during the 2-week deployment in September 2021.

That said, it should be emphasised that the radiation levels YanDavos II was exposed to during the active trials were relatively benign in comparison to the radiation levels known to exist in several locations inside the Shelter Object. Further development is therefore necessary to improve the current circuit designs with additional radiation resistance features. Additionally, valuable experiences gained during the deployment regarding practical deployment use cases and feedback regarding the user interface will be taken into account during the design phase of the next iteration of the instrument, YanDavos III.

### **Acknowledgments**

The authors wish to thank Maxim Saveliev and Pavel Sabenin from the Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants (ISPNPP) in Ukraine for their assistance deploying YanDavos II inside ChNPP, as well as their valuable feedback regarding user experience and suggested improvements for the instrument. The authors would also like to thank Anastasiia Nechytailo from the State Agency of Ukraine on Exclusion Zone Management, without whom none of the field trials inside the ChEZ would have been possible. We are very grateful for the smooth and productive collaboration between Ukrainian and British stakeholders on this project.

The authors also thank the Robotics and Artificial Intelligence in Nuclear Industry (RAIN) for providing the funding to build the YanDavos II prototype, and for financing its deployment in Ukraine.

### **References**

1. E. I. Holland, P. Martin, Y. Verbelen, D. Connor, K. Wood, and T. B. Scott, "Characterisation of Specimens from a Former Soviet Thorium Processing Facility to Support Site Remediation," Tech. Rep. INIS-US-21-WM-20-P20596, WM Symposia, Inc., PO Box 27646, 85285-7646 Tempe, AZ (United States) (2020).
2. K. Wood, D. Connor, S. Goren, D. Megson-Smith, S. White, P. Martin, Y. Verbelen, E. Holland, T. Richardson, and B. Scott, "UAS radiation hot-spot detection and refinement," in 22nd EGU General Assembly, (2020), p. 1744.
3. D. Connor, K. Wood, P. Martin, Y. Verbelen, S. Goren, E. Holland, D. Megson-Smith, N. Smith, T. Richardson, and Scott, "Multiscale UAS Radiation Mapping Within the Chernobyl Exclusion Zone (CEZ)," in 22nd EGU General Assembly, (2020), p. 5327.
4. J. Teague, D. Megson-Smith, Y. Verbelen, T. B. Scott, and J. C. Day, "Underwater spectroscopic techniques for in-situ nuclear waste characterisation," in WM2022 Conference, (2022), p. 9.

5. E. Potemkin, P. Astafurov, A. Osipov, M. Malenkov, V. Mishkinyuk, and P. Sologub, “Remote-controlled robots for repair and recovery in the zones of high radiation levels,” in Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, 1992), pp. 80,81,82.

6. C. Hutson, A. Banos, D. Connor, K. Zhang, S. Kaluvan, S. White, Y. Verbelen, M. Ryan Tucker, J. Knighton, Wood, M.-S. David, E. Holland, P. Martin, and T. B. Scott, “Development of robotic inspection systems for in-situ characterisation prior to decommissioning,” in WM2020 Conference, (2020).

7. J. Abouaf, “Trial by fire: teleoperated robot targets Chernobyl,” IEEE Comput. Graph. Appl. 18, 10–14 (1998).

8. M. Rowland, M. Holliday, J. Karpachov, and A. Ivanov, “Proposed radiation hardened mobile vehicle for Chernobyl dismantlement and nuclear accident response,” Tech. rep., Lawrence Livermore National Lab., CA (United States), United States (1995).

9. B. Bird, M. Nancekievill, A. West, J. Hayman, C. Ballard, W. Jones, S. Ross, T. Wild, T. Scott, and B. Lennox, “Vega—A small, low cost, ground robot for nuclear decommissioning,” J. Field Robotics 39, 232–245 (2022).

10. F. S. Russell-Pavier, “Testing radiation using frozen fluid laden with energy sensors,” Master’s thesis, Interface Analysis Centre, School of Physics, University of Bristol (2018).

11. Y. Verbelen, P. G. Martin, K. Ahmad, S. Kaluvan, and T. B. Scott, “Miniaturised Low-Cost Gamma Scanning Platform for Contamination Identification, Localisation and Characterisation: A New Instrument in the Decommissioning Toolkit,” Sensors 21, 2884 (2021).

12. D. Megson-Smith, Y. Verbelen, M. Saveliev, P. Sabenin, A. Nechytailo, E. Holland, M. Ryan Tucker, P. Martin, D. Connor, F. Russell-Pavier, and T. B. Scott, “Radiological imaging of the Chornobyl Reactor 4 Shelter with YanDavos II,” in WM2022 Conference, (2022), p. 13.

13. Y. Verbelen, D. Megson-Smith, F. Russell-Pavier, P. Martin, D. Connor, M. Ryan Tucker, and T. B. Scott, “A Flexible Power Delivery System for Remote Nuclear Inspection Instruments,” in 2022 8th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA), (2022), pp. 170–175. ISSN: 2767-7745.

14. R. French, H. Marin-Reyes, G. Kapellmann-Zafra, and S. Abrego-Hernandez, “Development of an intelligent robotic additive manufacturing cell for the nuclear industry,” in Advances in Manufacturing, Production Management and Process Control, W. Karwowski, S. Trzcielinski, and B. Mrugalska, eds. (Springer International Publishing, Cham, 2020), pp. 3–13.

## **A REACTIVITY ACCIDENT THIRTY-SIX YEARS LATER**

*Borysenko Volodymyr, Goranchuk Vadym*

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, Kyiv  
vborysenko@ispnpp.kiev.ua

The results of a study on the model of a reactivity accident at RBMK-1000, which destroyed the RBMK-1000 reactor of power unit No. 4 of the Chornobyl NPP on April 26, 1986, are presented. The model of reactivity accident at the RBMK-

1000 was developed based on the equations of nuclear reactor kinetics, taking into account feedback on the reactivity effects.

In the model, the reactivity changes as a result of external influences: the movement of control rods; changes in the coolant temperature at the reactor inlet, as well as a result of feedback on reactivity effects: changes in fuel temperature, coolant density,  $^{135}\text{Xe}$  concentration. The change in coolant density is determined by taking into account the formation of steam in the reactor core.

The study of the reactivity accident at the RBMK-1000 was carried out for different combinations of the efficiency of the control rods; reactivity coefficients by fuel temperature and coolant density; changes in coolant temperature at the reactor inlet; emergency protection triggering time, as well as the reactor power level before closing the shut-off valves of the turbogenerator.

The paper presents the most important results of the research – a significant impact on the course of a reactivity accident of emergency protection triggering time after the shut-off valves of the turbogenerator are closed; reactor power level before closing the shut-off valves of the turbogenerator.

**Keywords:** uranium-graphite reactor, reactivity, temperature coefficient of reactivity, density reactivity coefficient, end effect, graphite displacer.

## **Introduction**

Today, 36 years after the Chernobyl accident, discussions continue on several issues regarding the possible course of the accident.

Let us study the most important in our opinion.

1. It is considered that from the moment of shutdown of shut-off valves of the turbogenerator (TG SOVs) initiation of AZ-5 emergency protection (SCRAM) would lead to an identical accident [1].

2. Currently, there are no studies on the effect of the power level of RBMK - 1000 before the closure of the TG SOVs on the scale of reactivity accidents [1].

Earlier in our work, we analyzed the reactivity effects in various reactor facilities, both uranium-graphite (fuel-moderator) and water-water (moderator-cooler) [2-4].

An important feature of the physical model of RBMK is the simulation of steam generation in the coolant. This is important because, when operating at nominal power levels, about half of the energy of the fission reaction goes to heat the coolant ( $\sim 15\text{ }^\circ\text{C}$ ) in the fuel channels (FC) to saturation temperature, and the other half of the energy goes to generate steam in the coolant. Taking into account that the specific volume of steam, in the RBMK-1000 design ranges of variation of coolant parameters, is  $\sim 20$  times greater than for water [4], it is obvious that taking into account the variation of coolant density, taking into account the steam generation in the FC, will lead to significantly greater insertion of positive reactivity than when considering the reactivity feedback only by the coolant temperature coefficient of reactivity (TCR) [4].

## **Reactor model**

The main parameters of the RBMK model were obtained by the authors both for the one RBMK-1000 polycell (consisting of 16 FC, one channel with a control rod (CR), and one channel of an additional absorber) [3, 4] and for four polycells

(with 64 FCs), in which criticality conditions are achieved at a height of  $\sim 1.7$  m and an average fuel enrichment of 1.15%, which corresponds to the average fuel enrichment in RBMK-1000 the day before the accident [3, 4]. Geometric and material characteristics of FC and fuel elements are standard for the 2nd generation of RBMK-1000 (ChNPP-4).

The neutron power is determined from the equations of the point kinetics of neutrons in the reactor [2-4]:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{l} N(t) + \sum_i \lambda_i c_i(t) \quad (1)$$

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l} N(t) - \lambda_i c_i(t) \quad (2)$$

where  $N(t)$  – neutron flux density (neutron power of the reactor);  
 $\rho(t)$  – reactivity at time  $t$ ;  $\beta$  – effective fraction of delayed neutrons;  
 $\beta_i$  – fraction of delayed neutrons from the precursor nuclei of the  $i$ -th group;  
 $\lambda_i$  – decay constant of the precursor nuclei of the  $i$ -th group;  $l$  – average generation time of instantaneous neutrons;  $c_i$  – concentration of precursor nuclei of the  $i$ -th group of delayed neutrons.

The influence of feedback in the reactor model is taken into account by determining the change in the reactor reactivity  $\Delta\rho(t)$  due to the movement of the CR, changes in the temperature and density of the coolant at the reactor inlet, as well as the reactivity released due to the action of feedbacks: changes in fuel temperature, changes in coolant density, changes in  $^{135}\text{Xe}$  concentration and other parameters:

$$\Delta\rho(t) = \Delta\rho_{\text{CR}}(t) + \frac{\partial\rho}{\partial\gamma_c} \Delta\gamma_c(t) + \frac{\partial\rho}{\partial T} \Delta T(t) + \frac{\partial\rho}{\partial X_e} \Delta X_e(t) + \dots \quad (3)$$

where  $\Delta\rho_{\text{CR}}(t)$  – reactivity inserted by moving of the CR;

$\frac{\partial\rho}{\partial\gamma_c}$  – reactivity coefficient by coolant density (RCCD);

$\frac{\partial\rho}{\partial T}$  – reactivity coefficient by fuel temperature (RCFT);

$\frac{\partial\rho}{\partial X_e}$  – reactivity coefficient by  $^{135}\text{Xe}$  concentration.

The heat balance equations for fuel and coolant in the reactor core are used to determine the fuel and coolant temperature, as well as to determine the mass fraction of steam at the reactor core outlet.

In contrast to traditional models for taking into account the effect of feedback by the moderator (coolant) temperature for PWR reactors [2, 3], for RBMK-1000 reactors, steam generation in the core is taken into account. To account for steam generation, an additional term appears in the heat balance equations for the coolant (5):

$$\frac{dT}{dt} V c \gamma = q_V V - q_S S \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} c_c M_c = q_S S - \gamma_c c_c G_c (\theta_{out} - \theta_{in}) - P \gamma_c G_c (h'' - h') \quad (5)$$

where  $V$  – fuel volume;  $S$  – area of the side surface of the fuel rods in the core;  $c$  – fuel heat capacity;  $\gamma$  – fuel density;  $c_c$  – coolant heat capacity;  $\gamma_c$  – coolant density;



$M_c$  – coolant mass in the core;  $G_c$  – volumetric flow rate of the coolant;  $\theta_{in}$  – coolant temperature at the core inlet;  $\theta_{out}$  – coolant temperature at the core outlet;  $q_v$  – volumetric energy release in the fuel;  $q_s$  – heat flux from the surface of the fuel rod;  $P$  – steam fraction in the core coolant;  $h''$  – the enthalpy of steam at saturation temperature,  $h'$  – enthalpy of water at saturation temperature.

In the model of the RBMK-1000 reactor, an iterative scheme for solving equations (1 – 5) with an appropriate selection of the time step is implemented.

The chronology of external influences and events during testing with the TG run-out, as well as the ranges of change in the values of RCFT and RCCD, are taken from design data or other known publications [5, 6].

By [5, 6], the following chronology was detected:

- 0.0 s – closing of the TG SOVs and start of the main circulation pump (MCP) run-out (astronomical time 26.04.1986 01:23:04);
- 6.6 s – power connection of 4 MCPs to the run-out TG;
- 36.0 s – pressing the AZ-5 button and control rods insertion with the efficiency  $\Delta\rho_{CR}$  into the core at a speed of 40 cm/s;
- 6.6 – 42.0 s – decrease in the coolant flow rate due to a decrease in the speed of 4 MCPs connected to the run-out TG from 1.0 to 0.75 of the nominal coolant flow rates through the MCP, as a result of which the coolant temperature increases and, accordingly, the density decreases.
- 43 s – drop in the coolant flow rate through the reactor by ~ 40 % for the MCPs connected to a reliable power supply, and up to 0 m<sup>3</sup>/h for the MCPs connected to the run-out TG. In this case, the coolant flow through the reactor decreases to ~18000 m<sup>3</sup>/h [5, 6].

Based on the described RBMK-1000 model, the paper presents the results of a study of the influence of the following factors on the accident process:

- Efficiency of the so-called "end effect" of CR;
- Different combination of minimum and maximum values of reactivity coefficients by fuel and coolant;
- Power level before TG run-out tests;
- Triggering time of AZ-5 emergency protection.

### **Influence of the "end effect" efficiency of CR on the scale of a reactivity accident**

In Fig.1. the results of modeling the change in the neutron power of the reactor during the reactivity process depending on the efficiency of the "end effect" are presented for the following values of RCFT -0.000015 C<sup>-1</sup> and RCCD -0.028 g<sup>-1</sup>·cm<sup>3</sup>.

Thus, it can be stated that the recorded time of the initial destruction of the core (~8 s after the AZ-5 was triggered) in the model can be obtained at the value of the "end effect" efficiency  $+(0.41\pm 0.05) \beta$ . An additional factor confirming this version is a comparison with other recorded data, namely, an increase in the reactor power to 530 MW was recorded at 3 s after the AZ-5 was triggered.

With RCFT -0.000008 C<sup>-1</sup>, and RCCD -0.028 g<sup>-1</sup>·cm<sup>3</sup>, the fuel destruction time in the model corresponds to that recorded (~8 s after AZ-5 was triggered) at the value of the "end effect" efficiency  $+(0.32\pm 0.05) \beta$ .

## **Influence of reactor thermal power level on the course of reactivity accident**

Table 1 presents the results of modeling the change in the neutron power of the reactor during the reactivity process depending on the reactor power level before the start of tests with the TG run-out.

Table 1. The maximum power level and the time it takes to achieve it, depend on the initial power level of RBMK-1000 before testing.

Parameter	Initial power, % (MW)				
	4.69 (150)	6.25 (200)	7.81 (250)	9.38 (300)	21.88 (700)
Maximum power, %	3446	3218	1294	731	174
The time it takes to achieve maximum power, s	44.1	44.0	44.0	44.1	45.2

As expected, the power level at the beginning of the reactivity process significantly affects the amplitude of the neutron power growth.

By the TG Run-Out Test Program, the thermal power level of RBMK - 1000 should be at the level of 700 MW before the start of the tests. In this case, the maximum value of neutron power at the operation of AZ-5 would be ~170 % of the nominal power (this is ~ 20 times less than in the case of the initial power of 200 MW), and, consequently, it would not lead to the destruction of fuel and, consequently, to the reactor destruction as well.

### **Influence of triggering time of AZ-5 on the course of reactivity accident**

The INSAG materials [1] state that under the conditions prevailing in the reactor on the eve of the tests, starting from 01:23:00, the operation of AZ-5 at any time would have led to similar catastrophic consequences.

with the results of studies carried out on the RBMK-1000 model, the main hypothesis confirming the possibility of catastrophic destruction of the fuel is as follows: the maximum increase in power in ~8 s after the triggering of the AZ-5, leading to the destruction of the fuel during the implementation of such external influences as the operation of the AZ-5 and a sharp decrease in the coolant flow through the reactor is possible only with a certain synchronization of these effects in time.

In Fig.2. the results of modeling the change in neutron power when AZ-5 is triggered at different points in time after the closure of TG SOVs are presented.

It can be noted that when the AZ-5 is activated up to 32 s after the closure of the TG SOVs, the influence of the external actions mentioned above is spaced in time and the reactivity effects are not superimposed, and, therefore, there is no significant increase in the neutron power. Therefore, the triggering of AZ-5 with the requirements of the Operation Regulations [7], by the fact of shutting down of the last operating TG does not lead to fuel destruction.

It can also be noted that in the test with TG run-out on 26 April 1986, the AZ-5 event-initiator should be not so much the closure of the TG SOVs, as the fact of simulation of a power outage, at least for half of the important equipment that provides heat removal from the core fuel, so the blocking of the AZ-5 is unjustified.

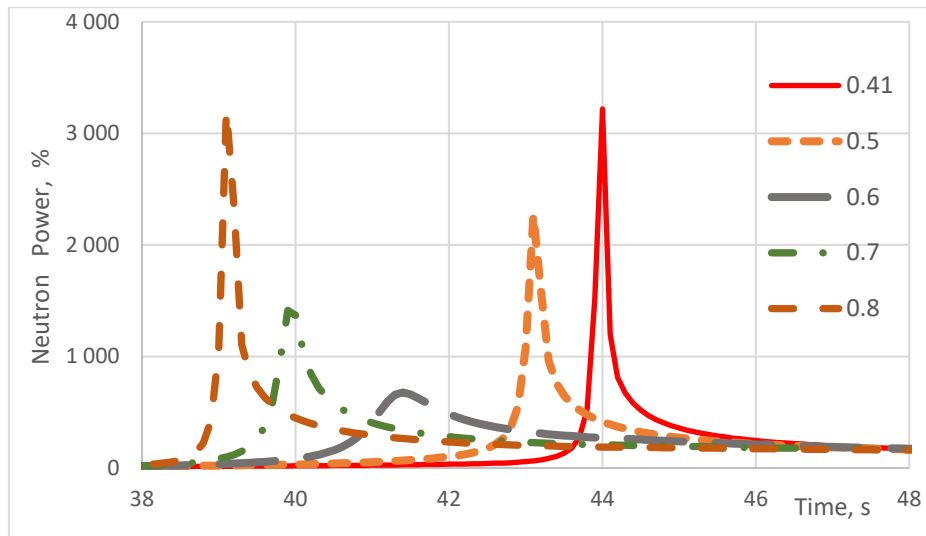


Fig.1. Change in neutron power depends on the efficiency of the "end effect" of CR. Legend - the efficiency of the "end effect" of CR,  $\beta$ .

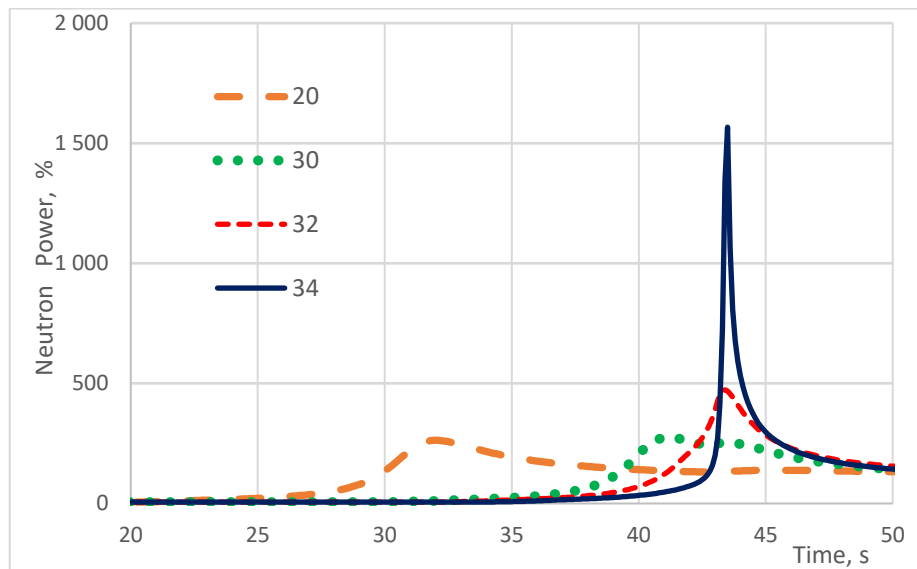


Fig.2. Change in neutron power depends on the time of AZ-5 triggering. Legend - the time of AZ-5 triggering, s.

## Conclusions

1. The RBMK-1000 reactivity accident model was used to determine the model parameters in which the fact of reactor destruction in simulation is consistent with the registered parameters and events during the accident.

2. High sensitivity of the reactivity accident model to the values of RCFT and RCCD in the range of their change according to design data is confirmed [1].

3. Carrying out TG run-out tests at a reactor thermal power level of  $\sim 700$  MW according to the Test Program does not lead to fuel destruction.

4. Blocking of AZ-5 at shutdown of the last working TG when operating at the level of electric power less than  $\sim 100$  MW is allowed by regulations of operation of Chernobyl-4 in an edition of 1983. However, in the test with TG run-out on 26 April 1986, the AZ-5 event-initiator should be not so much the closure of the TG SOVs, as the simulation of a power outage, at least for half of the important equipment that provides heat removal from the core fuel, so the blocking of the AZ-5 is unjustified.

The time of operation of the AZ-5 has a significant impact on the course of the reactivity accident. Triggering the AZ-5 at any time up to ~ 32 s after closing the TG SOVs does not lead to fuel destruction.

### References

1. INSAG-7. The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1. IAEA. 1992. p.135.
2. Борисенко В. И. Определение консервативных параметров модели реактора для исследования переходных режимов работы ВВЭР-1000 / В. И. Борисенко, В. В. Горанчук // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2013. — Вип. 20. — С. 28–36.
3. Борисенко В. И. О ядерной безопасности уран-графитовых реакторов / В. И. Борисенко // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2016. — Вип. 26. — С. 15–26.
4. Борисенко В. І. Модель реактивнісної аварії РБМК-1000 енергоблока № 4 Чорнобильської АЕС / В. І. Борисенко, В. В. Горанчук // Ядерна енергетика та довкілля № 2 (21) 2021. С. 39-48.
5. Карпан Н. В. Чернобыль. Месть мирного атома / Н. В. Карпан. — 2006. — Режим доступа: [www.twirpx.com/file/121267](http://www.twirpx.com/file/121267).
6. Дмитриев В. М. Причины Чернобыльской аварии известны / В. М. Дмитриев. — Режим доступа: [www.accident.ru](http://www.accident.ru).
7. Технологический регламент по эксплуатации 3 и 4 энергоблоков Чернобыльской АЭС с реакторами РБМК-1000. 1Э-С-П. — Введен в действие на основании приказа № 953 от 15.12.1983 г. — Чернобыль: ЧАЭС, 1983. — 98 с.

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ПОРОВОМУ ПРОСТОРІ ЛАВОПОДІБНИХ ПАЛИВОВМІСНИХ

*Габелков С. В.<sup>1</sup>, Долін В. В.<sup>2</sup>, Жиганюк І. В.<sup>1</sup>, Зубко О. В.<sup>2</sup>, Краснов В. О.<sup>1</sup>, Кудлай В. Г.<sup>1</sup>, Пархомчук П. Є.<sup>1</sup>, Савченко Б. С.<sup>1</sup>, Чиколовець С. О.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, Чорнобиль, [s.gabelkov@ispnpp.kiev.ua](mailto:s.gabelkov@ispnpp.kiev.ua)

<sup>2</sup>ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ

Досліджено фізико-хімічні процеси в лавоподібних паливовмісних матеріалах (ЛПВМ) 4-го блоку Чорнобильської АЕС. Використано раніше створену лабораторну установку. Її основним вузлом є електрохімічна комірка. В ній відбувається генерування реагентів, що забезпечують внутрішньопорове вилуговування урану, продуктів поділу та продуктів активації з мікрровключень на основі оксиду урану та перерозподіл їх в поровому просторі. Експерименти проведено зі зразком ЛПВМ орієнтовними розмірами 2 x 2 x 2 мм. Використовували два різних водних розчинів електролітів при двох концентраціях. Одержано дані хроноамперометрії. Ефективність переносу іонів оцінено через параметр, який характеризує кількість перенесених зарядів на стаціонарній стадії

у комірці за час експерименту. Експериментально встановлено оптимальні параметри, хімічний склад і концентрацію водного розчину електроліту для проведення електрокінетичних процесів в поровому просторі ЛПВМ.

**Ключові слова:** паливовмісні матеріали, чорна кераміка, вилуговування, перерозподіл, поровий простір, оксиди урану, електрохімічна комірка.

### **PARAMETERS OPTIMIZATION OF ELECTROKINETIC PROCESSES IN THE PORE SPACE OF LAVA-LIKE FUEL-CONTAINING MATERIALS**

*Gabelkov<sup>1</sup> S. V., Dolin V. V., Zhyganiuk<sup>1</sup> I. V., Zubko O. V., Krasnov<sup>1</sup> V. O.,  
Kudlay<sup>1</sup> V. G., Parhomchuk<sup>1</sup> P. E., Savchenko<sup>1</sup> B. S., Chikolovets<sup>1</sup> S. O.*

*<sup>1</sup>Institute of Safety Problems of Nuclear Power Plants of NAS of Ukraine,  
Chernobyl, s.gabelkov@ispnpp.kiev.ua*

*<sup>2</sup>DU Institute of Environmental Geochemistry, Kyiv*

*Physicochemical processes in lava-like fuel-containing materials (LFCM) of the 4th unit of the Chernobyl NPP have been studied. A previously created laboratory installation was used. Its main node is an electrochemical cell. It generates reagents that provide intraporous leaching of uranium, fission products and activation products from microinclusions based on uranium oxide and their redistribution in the pore space. The experiments were performed with a sample of LFCM with approximate dimensions of 2 x 2 x 2 mm. We used two different aqueous solutions of electrolytes at two concentrations. Chronoamperometry data were obtained. The efficiency of ion transfer was evaluated through a parameter that characterizes the number of transferred charges in the stationary stage in the cell during the experiment. The optimal parameters, chemical composition and concentration of the aqueous electrolyte solution for conducting electrokinetic processes in the pore space of LFCM were experimentally established.*

**Keywords:** *fuel-containing materials, black ceramics, leaching, redistribution pore space, uranium oxides, electrochemical cell.*

### **КІЛЬКІСНІ ОЦІНКИ ВМІСТУ КРИСТАЛІЧНИХ ФАЗ У БАГАТОФАЗНИХ ЗРАЗКАХ НА ОСНОВІ ДАНИХ РЕНТГЕНІВСЬКОЇ ДИФРАКЦІЇ**

*Габелков С. В., Жиганюк І. В., Скорбун А. Д.*

Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, Чорнобиль,  
i.zhyganiuk@ispnpp.kiev.ua

**Ключові слова:** лави паливовмісних матеріалів, нантокіт, еріокальцит, параметр кореляції, кількісні оцінки вмісту кристалічних фаз, рентгенівська дифракція

Розроблено метод оцінки відносного вмісту кристалічних фаз багатофазних зразків на основі ймовірнісного аналізу інтенсивностей ліній рентгенівської дифракції. Досліджено набори даних рентгенівської дифракції від зразків, створених із мінералів нантокіту  $CuCl$  і еріокальциту  $CuCl \cdot 4 \cdot H_2O$  трьох наперед заданих співвідношень вмісту цих двох фаз. В цій роботі провели порівняння вмісту цих фаз на основі введеного параметру кореляції  $S$ . За означенням цей параметр є згорткою двох векторів, побудованих на даних рентгенівської дифракції при відповідних значеннях кутів  $i$  для кристалічної фази нантокіту має вигляд:

$$S_{CuCl}^{(max)} = \sum_i^N b_i^{(CuCl)} b_i^{(CuCl)} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Параметр кореляції між векторами побудовано на експериментальних даних рентгенівської дифракції зразка з нантокітом і відповідними даними із бази даних рентгенівської дифракції COD

$$S_{CuCl} = \sum_i^N g_i^{(CuCl)} b_i^{(CuCl)} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Порівняння числових значень параметрів кореляції із врахуванням відповідних коефіцієнтів поглинання (визначених експериментально) створює можливість кількісного аналізу вмісту фаз в багатофазних матеріалах.

Представлений метод створений для кількісного аналізу вмісту фаз в багатофазних матеріалах – лавах паливовмісних матеріалів, що утворились під час Чорнобильської аварії в 1986 р.

## **QUANTITATIVE ESTIMATES OF THE CONTENT OF CRYSTALLINE PHASES IN MULTIPHASE SAMPLES BASED ON X-RAY DIFFRACTION DATA**

*Gabielkov S. V., Zhyganiuk I. V., Skorbutun A. D.*

*Institute of Safety Problems of Nuclear Power Plants of NAS of Ukraine,  
Chornobyl, i.zhyganiuk@ispnpp.kiev.ua*

**Keywords:** *fuel-containing materials, nantokite, eriochalcite, correlation coefficient, quantitative estimates of the content of crystalline phases, X-ray diffraction*

*A method for estimating the content of crystalline phase of multiphase samples on probabilistic analysis of the intensity of linear X-ray diffraction has been developed. X-ray diffraction data sets from samples created from the minerals nantokite  $CuCl$  and eriochalcite  $CuCl \cdot 4 \cdot H_2O$  of three predetermined ratios of the content of these two phases were studied. In this work, the content of these phases*

was compared based on the introduced correlation parameter  $S$ . By definition, this parameter is a convolution of two vectors built on X-ray diffraction data at the appropriate values of angles and the crystalline phase of the nantokite

$$S_{CuCl}^{(max)} = \sum_i^N b_i^{(CuCl)} b_i^{(CuCl)} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

The correlation parameter between the vectors is based on experimental data of X-ray diffraction of the sample with nantokite and the corresponding data from the X-ray diffraction database COD, which is expressed by the formula

$$S_{CuCl} = \sum_i^N g_i^{(CuCl)} b_i^{(CuCl)} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Comparison of numerical values of correlation parameters taking into account the corresponding absorption coefficients (determined experimentally) creates the possibility of quantitative analysis of the content of phases in multiphase materials.

The presented method is created for quantitative analysis of the content of phases in multiphase materials – lava-like fuel-containing materials, formed during the Chernobyl accident in 1986.

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ УТВОРЕННЯ МЕДИЧНИХ РАДІОІЗОТОПІВ ПРИ ОПРОМІНЕННІ НЕЗБАГАЧЕНОГО УРАНУ**

Гірка Ігор<sup>1</sup>, Азаренков Микола<sup>1</sup>, Рудичев Володимир<sup>1</sup>, Рудичев Єгор<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків

<sup>2</sup>Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»,

м. Харків

igorgirka@karazin.ua

Основою промислового виробництва радіоізоотопів у світі є опромінення високозбагаченого урану в реакторах. Через концепцію нерозповсюдження ядерних матеріалів у різних установках реалізують програми використання низькозбагаченого урану. Поставка і опромінення низькозбагаченого урану в Україні, наприклад, у підкритичній збірці, що вводиться в дію в ННЦ ХФТІ, є малоймовірною. Внаслідок досліджень процесів напрацювання радіоізоотопів при опроміненні стабільних ізоотопів (Мо, Сu і т.п.) гама-квантами і нейтронами показано, що виходи радіоізоотопів, які використовують для медичних цілей, є малими та неефективними для практичного використання [1].

Метою запропонованої роботи є дослідження процесів ефективного утворення <sup>99</sup>Mo у мішені з незбагаченого (природного - <sup>nat</sup>U) урану при

опроміненні  $\gamma$ -квантами і нейтронами. Аналіз накопичених на даний момент даних показує невизначеність ефективності використання незбагаченого урану в якості мішеней для напрацювання радіоізоотопів при опроміненні нейтронами від джерела у вигляді підкритичної збірки. Відсутні дані про співвідношення внесків гама-квантів і нейтронів у розподіл незбагаченого урану для скінченних розмірів мішені, а також розподіл утворених ізоотопів залежно від часу опромінення. Передбачається дослідити ефективність процесів утворення  $^{99}\text{Mo}$  та інших радіоізоотопів (мішені зі стабільних ізоотопів) для підкритичної збірки. Попередні дослідження, проведені нами, показали, що ефективність напрацювання  $^{99}\text{Mo}$  з природного урану в підкритичній збірці в 3÷5 разів вище, ніж при опроміненні природного молібдену.

Буде проведено пряме моделювання методом Монте-Карло з урахуванням реальної геометрії підкритичної збірки для визначення характеристик нейтронних потоків і  $\gamma$ -квантів, а також критичності при розміщенні в різних каналах мішені з  $^{nat}\text{U}$ , який опромінюється [2]. Для аналізу напрацювання ізоотопів, утворених унаслідок поділу  $^{235}\text{U}$  і  $^{238}\text{U}$ , які містяться в природному урані, з урахуванням зміни потоків  $\gamma$ -квантів і нейтронів в об'ємі мішені, будуть використані чисельні методи розв'язання рівнянь Бейтмана. На основі проведеного аналізу для різних варіантів опромінення будуть визначені оптимальні часи напрацювання радіоізоотопів. З використанням модифікованого методу об'ємного інтегрування точкових джерел випромінювання і методу Монте-Карло буде створена методологія розрахунку дозових навантажень від опромінених мішеней, що дасть можливість в оптимальний спосіб планувати роботу з урахуванням норм радіаційної безпеки [3]. Дослідження використання природного урану та оптимізація умов опромінення як урану, так і стабільних ізоотопів покажуть шляхи збільшення обсягу радіоізоотопів, у першу чергу  $^{99}\text{Mo}$ . Ці дослідження дадуть можливість організувати виробництво радіоізоотопів в Україні.

#### **Список використаних джерел:**

1. V. G. Rudychev, Y. V. Rudychev, D. V. Fedorchenko. Optimization of  $^{99m}\text{Tc}$  isotope production system using coupled Monte Carlo and fluid dynamics methods // AccApp '17, 13th International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerators, July 31-August 4 2017, Québec City, Québec, Canada, P.492-501, <http://accapp17.org/>, ISBN: 978-0-89448-739-2, American Nuclear Society 2017.

2. V. G. Rudychev, M. O. Azarenkov, I. O. Girka, Y. V. Rudychev. The efficiency of radiation shielding made from materials with high atomic number and low mass density // 2021. Вопросы атомной науки и техники, том 132 (2), с. 74-79.

3. V. G. Rudychev, N. A. Azarenkov, I. O. Girka, Y. V. Rudychev. Change in radiation characteristics outside the SNF storage container as an indicator of fuel rod cladding destruction // 2021. Nuclear Engineering and Technology, vol. 53, issue 11, p. 3704-3710.



# STUDY OF EFFICIENCY OF PROCESSES OF FORMATION OF MEDICAL RADIOISOTOPES DURING IRRADIATION OF UNENRICHED URANIUM

*Girka Igor<sup>1</sup>, Azarenkov Mykola<sup>1</sup>, Rudichev Volodymyr<sup>1</sup>, Rudichev Yegor<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv*

<sup>2</sup>*National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology", Kharkiv  
igorgirka@karazin.ua*

**Abstract:** Irradiation of highly enriched uranium in reactors is the basis of industrial production of radioisotopes all over the world. Due to the concept of non-proliferation of nuclear materials, low-enriched uranium programs are being implemented in various facilities. The authors plan to investigate the processes of efficient <sup>99</sup>Mo formation in a target from unenriched (natural <sup>nat</sup>U) uranium when irradiated with gamma-quanta and neutrons for the conditions of subcritical assembly. Previous studies have shown that the efficiency of <sup>99</sup>Mo formation from natural uranium in the subcritical assembly is 3÷5 times higher than when irradiating natural molybdenum. Direct Monte Carlo simulations will be carried out taking into account the real geometry of the subcritical assembly to determine the characteristics of neutron fluxes and gamma-quanta, as well as the criticality. Possibility to place the target with <sup>nat</sup>U to be irradiated in different channels will be considered. Numerical methods for solving Bateman equations will be used to analyze isotope activity. On the basis of the conducted analysis for different versions of irradiation, the optimum times of the radioisotopes formation will be defined taking into account the radiation safety requirements. Studies of the use of natural uranium and optimization of irradiation conditions for both uranium and stable isotopes will show ways to increase the amount of radioisotopes, especially <sup>99</sup>Mo. These studies will provide an opportunity to arrange the production of radioisotopes in Ukraine.

## ЗМІНИ ПОВЕРХНЕВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ЗОВНІШНИХ ПОВЕРХОНЬ КОНСТРУКЦІЙ ОБ'ЄКТУ «УКРИТТЯ» У ПЕРІОД ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОМПЛЕКСА НБК-ОУ

*Городецький Д. В., Павловський Л. І., Меньшенін Є. А.*

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль, Україна  
office@ispnpp.kiev.ua*

Герметизація внутрішнього об'єму комплексу НБК-ОУ від зовнішнього середовища (січень 2018 р.), призвела до утворення у ньому особливого мікроклімату, який характеризується відносною посушливістю, відсутністю суттєвих стаціонарних повітряних потоків та незначним коливанням сезонних температур. Такі умови сприяли зміні інтенсивності неорганізованих викидів радіоактивних аерозолів (РА) крізь отвори огорожувальних конструкцій об'єкта «Укриття» (ОУ), їхньому незначному розсіюванню у просторі, поступовому осадженню і накопиченню навколо джерел викиду, переважно, на поверхнях

конструкцій покрівель ОУ. Окрім того, будівельні роботи, які виконувались протягом періоду дослідно-промислової експлуатації (ДПЕ) комплексу НБК-ОУ, сприяли додатковому надходженню у повітря РА та відповідному збільшенню поверхневого забруднення (ПЗ) конструкцій у його внутрішньому об'ємі.

Таким чином, за період ДПЕ і до теперішнього часу (11.2021 р.), відбулось значне накопичення, як інертного (нерадіоактивного), так і радіоактивного пилу на поверхнях у внутрішньому об'ємі комплексу НБК-ОУ, яке наразі, вже спостерігається візуально. Так, аналіз даних попередніх досліджень вказує на збільшення середньої щільності ПЗ металевих конструкцій бета-активними нуклідами у 9,3 рази. При цьому, масова частка пилу на покрівлях ОУ становить до 15 г/м<sup>2</sup>. Аналіз елементного хімічного складу пилу свідчить, що його походження є наслідком виконання будівельних робіт, на що вказує значний вміст Са (72,0 %), а також інших металів – Fe (15,4 %), Zn (7,5 %), Со (3,1 %) тощо. За рахунок вмісту радіонуклідів, що становить до 580 кБк/кг  $\alpha$ -активних, а також до 19300 кБк/кг бета- і гамма-активних нуклідів, такий пил відповідає критерію першої групи середньоактивних РАВ (ОСПУ-2005).

Результати експериментальних досліджень показують, що від 80 до 99 % активності сучасного ПЗ конструкцій покрівель ОУ становить фракція нефіксованого забруднення, яке може бути видалено за допомогою промислового пилососу (потужність ~ 15 кПа). Такий технічно нескладний спосіб сухої дезактивації робочих поверхонь значно зменшить забруднення повітря у робочій зоні під час виконання демонтажу конструкцій ОУ, а також надає можливість найбільш економічно (за найменших дозо- і фінансових витрат) зібрати значну кількість РАВ для їхнього подальшого безпосереднього захоронення.

**Annotation:** Sealing of the internal volume of the NSC-OU complex from the external environment has led to a significant accumulation of dust on the external surfaces of the Shelter facilities. At present, the mass of dust is up to 15 g/m<sup>2</sup>. In terms of specific activity (580 kBq/kg of  $\alpha$ -active and 19,300 kBq/kg of beta- and gamma-active nuclides), dust belongs to the first group of intermediate-level radioactive waste. The efficiency of using an industrial vacuum cleaner for dry decontamination of work surfaces has been experimentally proven.

## **ВИЗНАЧЕННЯ ФОНОВИХ РІВНІВ РАДІАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ РАДІАЦІЙНО-ГІГІЄНІЧНИЙ СТАН НАВКОЛИШНЬОГО ТА ВИРОБНИЧОГО СЕРЕДОВИЩА НА МАЙДАНЧИКУ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО СХОВИЩА ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА**

*Деренговський В. В., Максименко А. М., Меньшенін Є. А.*

Інститут проблем безпеки АЕС Національної академії наук України,  
м. Чорнобиль

v.derengovsky@isnpp.kiev.ua, amaksimenko@chornobyl.net,  
y.menshenin@isnpp.kiev.ua

В результаті виконаної науково-технічної роботи було визначено фонові рівні радіаційних параметрів об'єкту ЦСВЯП, а також зафіксовано рівні

радіаційного благополуччя на території розташування майданчику ЦСВЯП до початку введення його в експлуатацію, що дасть змогу підготувати інформацію для розробки та актуалізації таких документів необхідних для організації радіаційного контролю ЦСВЯП: Регламент радіаційного контролю ЦСВЯП, Проектні контрольні рівні радіаційної безпеки ЦСВЯП, Програма радіаційного моніторингу ЦСВЯП, Адміністративно-технологічні рівні радіаційних параметрів ЦСВЯП.

«Енергетичною стратегією України на період до 2030 року», схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №1071-р, передбачено будівництво централізованого сховища для довгострокового зберігання відпрацьованого ядерного палива Рівненської, Хмельницької та Южно-Української атомних електростанцій.

Централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива (ЦСВЯП) реакторів типу ВВЕР вітчизняних АЕС розміщується в Чорнобильській зоні відчуження (Київська обл., Іванківський р-н).

Створення ЦСВЯП дозволить зміцнити енергетичну незалежність України, відмовившись від послуг Російської Федерації із зберігання ВЯП, вартість яких постійно зростає.

ЦСВЯП призначене для зберігання протягом 100 років 12010 відпрацьованих тепловидільних збірок (ВТВЗ) реакторів ВВЕР-1000 та 4519 ВТВЗ реакторів ВВЕР-440 Рівненської, Хмельницької і Южно-Української АЕС.

Метою цієї науково-технічної роботи було визначення фонових рівнів радіаційних параметрів для можливості аналізу ступеня радіаційного впливу об'єкту ЦСВЯП на персонал та навколишнє середовище, а також фіксації рівня радіаційного благополуччя на території розташування майданчику ЦСВЯП до початку введення його в експлуатацію, що дасть змогу підготувати інформацію для розробки та актуалізації документів необхідних для організації радіаційного контролю ЦСВЯП, а саме:

- Регламент радіаційного контролю ЦСВЯП;
- Проектні контрольні рівні радіаційної безпеки ЦСВЯП;
- Програма радіаційного моніторингу ЦСВЯП;
- Адміністративно-технологічні рівні радіаційних параметрів ЦСВЯП.

В результаті виконаної науково-технічної роботи було визначено фонові рівні радіаційних параметрів майданчику ЦСВЯП, що дало змогу зробити такі висновки:

- Величина ПД для промайданчиків підприємств на території 1-ї радіаційно-режимної зони (10-км зони ЧАЕС), де знаходиться майданчик ЦСВЯП, не нормується державними нормативними документами з РБ. Проте, середнє значення ПД на поточний момент часу, значно менше величини КР, який встановлено для робочих приміщень з постійним перебуванням персоналу для підприємств на цій території – 9 мкЗв/год. Цей факт свідчить про створення прийнятних радіаційних умов на майданчику ЦСВЯП, в контексті його розташування на території 1-ї радіаційно-режимної зони, яка характеризується надзвичайно високими рівнями радіоактивного забруднення. Виміряне максимальне значення ПД на території ЦСВЯП становить 0,18 мкЗв/год, в СЗЗ - 0,28 мкЗв/год і в ЗС - 0,53 мкЗв/год.

- Середня величина щільності поверхневого забруднення ґрунту бета-активними радіонуклідами (щільність потоку бета-часток) на майданчику ЦСВЯП та у ССЗ становить 22 бета-частинки (см<sup>2</sup>·хв)<sup>-1</sup>, що у 37 разів менше за величину контрольного рівня для цього показника для підприємств 1-ї радіаційно-режимної зони (10-км зони). Максимальна величина становить 138 бета-частинок (см<sup>2</sup>·хв)<sup>-1</sup>, що також значно менше контрольного рівня для даної території.

- Для територій ПЗРВ та комплексу «Вектор» встановлені такі контрольні рівні забруднення атмосферного повітря: середньорічна об'ємна активність (усереднене значення) для <sup>137</sup>Cs - 6.0E-04 Бк/м<sup>3</sup>, <sup>90</sup>Sr - 5.0E-04 Бк/м<sup>3</sup> та ТУЕ - 4.0E-04 Бк/м<sup>3</sup> при об'ємній активності за строк експозиції для <sup>137</sup>Cs - 2.1E-03 Бк/м<sup>3</sup>, <sup>90</sup>Sr - 1.9E-03 Бк/м<sup>3</sup> та ТУЕ - 1.5E-03 Бк/м<sup>3</sup>. Всі отримані результати об'ємної активності радіонуклідів у приземному шарі повітря не перевищують зазначені контрольні рівні.

- Допустимі концентрації радіонуклідів у питній воді для категорії В для <sup>137</sup>Cs - 1.0E+05 Бк/м<sup>3</sup>, <sup>90</sup>Sr - 1.0E+04 Бк/м<sup>3</sup> та <sup>238</sup>Pu, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Am - 1.0E+03 Бк/м<sup>3</sup>, <sup>241</sup>Pu - 8.0E+04 Бк/м<sup>3</sup>. Всі отримані результати концентрації радіонуклідів у дощовій стічній воді та ґрунтовій воді зі свердловини не перевищують зазначені допустимі концентрації у питній воді.

- На території ПЗРВ «Буряківка» у 2019 році зафіксовано такі рівні інтенсивності атмосферних випадінь: максимальне значення для <sup>137</sup>Cs - 6.0E-01 Бк/(м<sup>2</sup>·доба), <sup>90</sup>Sr - 5.0E-01 Бк/(м<sup>2</sup>·доба), <sup>238</sup>P - 2.0E-04 Бк/(м<sup>2</sup>·доба) та <sup>239</sup>+<sup>240</sup>Pu - 7.0E-04 Бк/(м<sup>2</sup>·доба), середнє значення для <sup>137</sup>Cs - 1.5E-01 Бк/(м<sup>2</sup>·доба), <sup>90</sup>Sr - 2.4E-01 Бк/(м<sup>2</sup>·доба), <sup>238</sup>P - 1.6E-04 Бк/(м<sup>2</sup>·доба) та <sup>239</sup>+<sup>240</sup>Pu - 4.7E-04 Бк/(м<sup>2</sup>·доба). Всі отримані результати інтенсивності атмосферних випадінь не перевищують зазначені значення. По <sup>137</sup>Cs для точок П2 і П3 в СЗЗ та у ЗС відповідні значення майже співпадають, а значення в точці П1 на території ЦСВЯП нижче майже в п'ять разів. По <sup>90</sup>Sr для точок П2 і П3 в СЗЗ та у ЗС відповідні значення нижче майже в чотири рази, а значення в точці П1 на території ЦСВЯП нижче майже в п'ятнадцять разів. По <sup>238</sup>P та <sup>239</sup>+<sup>240</sup>Pu для точок П2 і П3 в СЗЗ та у ЗС відповідні значення майже співпадають, а значення в точці П1 на території ЦСВЯП нижче майже в два рази. Значно нижчі значення інтенсивності атмосферних випадінь на території ЦСВЯП обумовлені тим, що майже вся ця територія забетонована чистим бетоном.

***DETERMINATION OF BACKGROUND LEVELS OF RADIATION  
PARAMETERS THAT CHARACTERIZE THE RADIATION AND HYGIENIC  
STATE OF THE ENVIRONMENT AND THE PRODUCTION  
ENVIRONMENT OF THE CENTRAL SPENT  
NUCLEAR FUEL STORAGE FACILITY SITE***

*The Centralized Spent Fuel Storage Facility (SNFSF) of WWER reactors of domestic NPPs is located in the Chornobyl Exclusion Zone (Kyiv Region, Ivankiv District). The creation of the CSF will strengthen Ukraine's energy independence by*

*abandoning the Russian Federation's ever-increasing spent nuclear storage services. The CSFNF is intended for storage for 100 years of 12010 spent fuel assemblies (VTVZ) of WWER-1000 reactors and 4519 VTVZ of WWER-440 reactors of Rivne, Khmelnytsky and South-Ukrainian NPPs. As a result of the performed scientific and technical work, the background levels of radiation parameters of the CSFF object were determined, as well as the levels of radiation well-being on the site of the CSFF site before its commissioning, which will allow to prepare information for development and updating CSF Radiation Control Regulations: CSF Radiation Control Regulations, CSF Radiation Safety Control Levels, CSF Radiation Monitoring Program, CSF Radiation Monitoring Program, Administrative and Technological Levels of CSF Radiation Parameters.*

## **ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО РЕАГУВАННЯ НА МОЖЛИВІ ЯДЕРНО ТА РАДІАЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНІ АВАРІЙНІ СИТУАЦІЇ У ЗВ'ЯЗКУ З БОЙОВИМИ ДІЯМИ В УКРАЇНІ**

*Казимиров О. С., Ієвлев С. М., Чорний Є. В.*

Нещодавно відомі фахівці у галузі атомної енергетики Микола Штейнберг та Віктор Шендерович розмістили свої думки щодо небезпеки військових дій та захоплення ядерних об'єктів в Україні на веб-сторінці відомого в Україні та світі Державного Науково-Технічного Центру з Ядерної та Радіаційної Безпеки.

Ми розділяємо їх оцінки ситуації, що склалася. Сам факт військових дій на об'єктах, що є джерелами ядерної та радіаційної безпеки, або містять індустриальні джерела іонізуючого випромінювання, може призвести до комунальної або навіть трансграничної аварії.

Наразі в Україні є нормативна та методична база щодо впровадження контраварійних заходів. Але вона не може повністю використовуватися у випадках, коли вихідні події аварії абсолютно не передбачувані.

Разом з цим, вже існуюча система протиаварійних заходів може бути використана для першочергових дій по радіаційному захисту населення за межами контрольованої зони. При цьому можна використовувати вже впроваджені методи прогнозування розповсюдження радіоактивних викидів АЕС у довкіллі.

У випадку руйнування ядерно або радіаційно-небезпечного об'єкта, про які йшлося вище, на наш погляд необхідно розглядати його наслідки як ранню стадію радіаційної аварії відповідно до НРБУ-97:

«Д.4.7.1 Період *ранньої фази* тривалістю від декількох годин до одного-двох місяців після початку аварії має наступні особливості:

(а) присутність у навколишньому середовищі короткоживучих *радіонуклідів*, включаючи радіоактивні благородні гази, які обумовлюють високі інтенсивності і градієнти гамма-полів;

(б) при значних викидах радіоізотопів йоду в *ранній фазі* аварії виділяється так званий *йодний період*, на протязі якого існує серйозна загроза

надходження інгаляційно і з продуктами харчування в організм людини цих *радіонуклідів* і, як наслідок, опромінення щитовидної залози осіб з населення, особливо дітей;

(в) поверхневе забруднення пасовищ, сінокосів, а також сільськогосподарської продукції.»

Це широке визначення, яке стосується важкої аварії на АЕС. В залежності від типу об'єкту (наприклад, сховище РАВ) його треба використовувати відповідним чином. Але, як мінімум, підпункт (в) відноситься для всіх типів об'єктів і лишається обов'язковим.

Зазначені характеристики можливої аварії потребують оперативного визначення. Рекомендації на такий випадок містяться у основоположних публікаціях МАГАТЕ [1, 2] та національних публікаціях. Крім цього, в Україні також вже накопичений великий досвід робіт з ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС, а також з моніторингу радіоактивного забруднення довкілля та характеристизації РАВ. Необхідно систематизувати міжнародний та національний досвід для підготовки робочих методик виконання відповідних вимірів з використанням наявного на сьогодні обладнання. При цьому необхідно максимально використовувати вже існуючі у різних організаціях технічні та методичні інструменти, розробити основні вимоги до нових необхідних технічних та апаратних засобів, які можна створити у максимально короткі терміни. Для цього треба оперативно створити групу спеціалістів, яка може узагальнити наявні ресурси та видати на їх основі відповідні рекомендації.

З свого боку спільна група фахівців Інституту проблем безпеки НАН України та ТОВ НВП «АтомКомплексПрилад» може запропонувати досить широкий спектр апробованих та впроваджених у багатьох організаціях України приладів та методик виконання вимірювань. Їх можна умовно розділити на такі групи (при цьому можна розглядати і можливості більш широкого використання):

- Оперативні засоби виявлення радіаційних аномалій та характеристизації радіаційного забруднення об'єктів гамма-випромінювачами:

- Портативний регістратор спектрів ПРС-01. Цей прилад може використовуватися як оперативний дозиметр, дозволяє швидко (біля 1 хвилини) виявляти аномалії, що на декілька процентів перевищують радіаційний фон у районі вимірів, використовуватися для контролю транспортних засобів, металобрухту, проведення радіаційного моніторингу, наприклад визначати густину радіаційного забруднення поверхні ґрунт та інших поверхонь; прилад використовувався для проведення вимірювань у Зоні відчуження ЧАЕС, перевірених у реальних умовах та поставлений до Японії для використання після аварії на АЕС у префектурі Фукушіма. Методики виконання вимірювань затверджені у встановленому порядку. При підключенні до ПК виконується автоматична обробка спектрів гамма-випромінювання з визначенням наявних радіонуклідів та їх активності при використанні у режимі вимірювання густини поверхневого забруднення або в якості польового спектрометра для визначених геометрій зразків.

– Сцинтиляційний спектрометр гамма-випромінювання СЕГ-001м «АКП-С» «Лісовик» призначений для проведення експрес-контролю на неперевищення припустимих рівнів забруднення сільськогосподарчої продукції та грибів, ягод та ін., що розфасовані у первинну тару (ящики). Результати вимірювань обробляються спеціальним програмним забезпеченням та документуються. Час вимірювання для одного ящика масою у 16 кг не перевищує 5 хвилин.

– Спектрометри випромінювання людини «СИЧ-АКП» призначені для визначення вмісту радіоактивних гамма-випромінюючих радіонуклідів у тілі людини. Призначені для оперативного індивідуального контролю персоналу та населення. Методика виконання вимірювань затверджена у встановленому порядку. Час контролю одної людини – декілька хвилин.

– Спектрометр гамма-випромінювання СЕГ-001м «АКП-С»-ТРО призначений для визначення ізотопного складу та активності гамма-випромінюючих радіонуклідів у твердих РАВ першої та другої групи без відбору проб безпосередньо у пакунках різної форми. Він впроваджений на всіх АЕС України та може застосовуватися для подібних робіт під час ліквідації наслідків аварії.

▪ Розробки, що використовуються на діючих АЕС:

– Системи контролю активності теплоносія першого контуру та контролю питомої активності рідких РАВ, що встановлені на майже всіх діючих реакторах, результати роботи цих приладів можуть дати вихідні дані для оцінки запасу активності рідин.

– Методи контролю глибини вигорання ядерного палива, що також можуть бути використані для планування можливих робіт по ліквідації аварій на енергоблоках або сховищах відпрацьованого ядерного палива.

Всі вказані прилади використовують автоматичну обробку даних спектрометрії за допомогою ПВМ. Програмні засоби пройшли необхідну валідацію та верифікацію. Методики виконання вимірювань затверджені у встановленому порядку.

Про такі та інші розробки добре обізнані представники АЕС, але рішення про їх використання може прийматися лише персоналом, що має реальну інформацію про характер аварії, що відбулася внаслідок обстрілу або іншого втручання у нормальну роботу установок.

### **Список використаних джерел**

1. Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency, (IAEA-TECDOC-1092);

2. Generic Assessment Procedures for Determining Protective Actions During a Reactor Accident (IAEA-TECDOC-955).

# ІНСТРУМЕНТИ СТРАТЕГІЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ, ПОСТРАЖДАЛИХ ВНАСЛІДОК БОЙОВИХ ДІЙ

*Коваленко Андрій, Сакаль Оксана*

Державна установа «Інститут економіки природокористування та сталого  
розвитку Національної академії наук України»  
Інститут землекористування Національної академії аграрних наук України,  
Київ  
komisar@bigmir.net, o\_sakal@ukr.net

The paper highlights modern instruments of strategic planning for the restoration of areas affected by hostilities in Ukraine. A description of the destruction and damage to housing, social and transport infrastructure of territories and settlements, industrial and agricultural sectors, as well as threats to the lives of citizens from the remnants of explosives are submitted. It was emphasized that in addition to urgent action to eliminate the threat and assess the consequences, it is necessary to develop programs for rehabilitation and sustainable development of affected territories using strategic planning instruments. The role and place of the newly created National Council for Reconstruction of Ukraine from the effects of war, the main tasks of which are to develop an action plan for postwar reconstruction and development of Ukraine, identify and develop proposals for priority reforms and preparation of relevant strategic initiatives and draft of normative legal acts, are analyzed. The latest legal decisions on improving the instruments of strategic planning for the reconstruction and development of territories and communities are studied. The problem of military wastes and the need to take it into account in solution of international approaches to the formation of a closed-loop economy and sustainable development are characterized.

Внаслідок бойових дій регіони та населені пункти України (зокрема, й значна частина чорнобильських територій) зазнали істотних ушкоджень. Так, за повідомленнями у ЗМІ та на офіційних веб-сайтах регіональних органів державної влади, у Київській області загалом зафіксовано руйнування у понад 25 700 будівель та споруд, серед яких – житлові будинки та соціальні об'єкти: навчальні заклади, дитячі садки, лікарні, інші об'єкти критичної інфраструктури. На національному рівні створюється державний реєстр пошкодженого/втраченого майна.

Окрім будівель, через війну значно постраждала транспортна інфраструктура України: пошкоджено 23 573 км доріг, 6 300 км залізниць, 289 автомобільних і 41 залізничний міст. Роботи з її відновлення потребуватимуть одного-двох років, а першочергово вони проводяться в межах населених пунктів. Зокрема, на території Іванківської територіальної громади було пошкоджено 12 мостів. Загалом у Київській області вже відновлено проїзд 22 штучними спорудами з 24, що були пошкоджені під час бойових дій на автомобільних дорогах загального користування.



Постраждала інфраструктура промислових об'єктів, ключових для забезпечення регіональної зайнятості та міського господарства – зокрема, Чорнобильської АЕС, Чернігівського асфальтного заводу, який постачав асфальтобетонну суміш для міста Славутич. Через мінну небезпеку значно ускладнене проведення сільськогосподарських робіт. Після окупації населених пунктів залишається загроза життю громадян з боку залишків боєприпасів та вибухонебезпечних предметів.

Усе вищезазначене, окрім невідкладних дій щодо усунення небезпеки та оцінки наслідків, робить нагальним розроблення програм відновлення та сталого розвитку постраждалих територій з використанням інструментів стратегічного планування.

Президентом України у квітні 2022 р. утворено Національну раду з відновлення України від наслідків війни, основними завданнями якої є розроблення плану заходів з післявоєнного відновлення та розвитку України, визначення і напрацювання пропозицій щодо пріоритетних реформ та підготовка відповідних стратегічних ініціатив і проектів нормативно-правових актів. Рада включає 23 робочі групи, зокрема, з питань: аудиту збитків, понесених внаслідок війни; відновлення та розвитку економіки; відновлення та розбудови інфраструктури; будівництва, містобудування, модернізації міст та регіонів; екологічної безпеки [1]. Розроблений під егідою Ради такий стратегічно-плановий документ, як програма відновлення України, може стати основним інструментом підтримки міжнародною спільнотою процесу реконструкції шляхом поєднання грантів і позик. За умови включення такої програми до бюджету ЄС можливо забезпечити прозорість, підзвітність та надійне організаційно-фінансове управління цим документом.

Стрімкий розвиток ситуації воєнного стану в Україні та численні пов'язані з цим руйнування зумовили відповідні правові рішення щодо вдосконалення інструментів стратегічного планування для відбудови та розвитку територій і громад. Так, Урядом затверджено Порядок виконання невідкладних робіт щодо ліквідації наслідків збройної агресії Російської Федерації, пов'язаних із пошкодженням будівель та споруд [2] та Порядок виконання робіт з демонтажу об'єктів, пошкоджених або зруйнованих внаслідок надзвичайних ситуацій, воєнних дій або терористичних актів [3].

Останніми змінами до законодавства, що набрали чинності в червні 2022 р., з метою сприяння відновленню територій і вдосконалення стратегічного планування їх розвитку визначено правові та організаційні засади відбудови зруйнованих територій, спрощено процедури розміщення тимчасових споруд для проживання внутрішньо переміщених осіб та зміни цільового призначення земельних ділянок, врегульовано питання розміщення виробничих потужностей релокованих підприємств, а також уведено таке поняття, як програма комплексного відновлення області, території територіальної громади (її частини) – обласна або місцева програма відновлення територій, яка визначає основні просторові, містобудівні та соціально-економічні пріоритети політики відновлення і включає комплекс заходів для забезпечення відновлення території відповідної області, території територіальної громади (її

частини), яка постраждала внаслідок збройної агресії проти України або в якій сконцентровані соціально-економічні, інфраструктурні, екологічні чи інші кризові явища [4].

Обласна програма розробляється відповідною обласною державною адміністрацією самостійно або із залученням відповідних фахівців підприємств, установ, організацій та затверджується відповідною обласною радою. Положення затвердженої програми комплексного відновлення області є складовими вихідних даних для розроблення програм комплексного відновлення населених пунктів (територій). Аналогічно розробляється та затверджується відповідною радою програма комплексного відновлення території територіальної громади (її частини).

Органами державної влади оперативно здійснюється розробка та прийняття низки методичних інструментів, що дають змогу приймати рішення щодо оцінки пошкоджень об'єктів, втрат і збитків для природних ресурсів, атмосферного повітря та розроблення програм відновлення і розвитку. Так, Міністерством розвитку громад та територій України для використання обстежувачами, а також власниками чи управителями об'єктів, сільськими, селищними, міськими радами, місцевими або військовими адміністраціями затверджено Методику обстеження будівель та споруд, пошкоджених внаслідок надзвичайних ситуацій, бойових дій та терористичних актів, яка дає змогу проводити обстеження з метою обґрунтування рішень щодо подальшої експлуатації пошкоджених об'єктів. Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України затверджено Методику розрахунку неорганізованих викидів забруднюючих речовин або суміші таких речовин в атмосферне повітря внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій та/або під час дії воєнного стану та визначення розмірів завданої шкоди, а також Методику визначення розміру шкоди, завданої землі, ґрунтам внаслідок надзвичайних ситуацій та/або збройної агресії та бойових дій під час дії воєнного стану.

У результаті бойових дій на територіях і в населених пунктах утворилася значна кількість «відходів війни» – залишків озброєнь і військової техніки, решток від зруйнованих будівель тощо. При цьому виникають потреби: врегулювання переробки металобрухту, утвореного внаслідок бойових дій; використання відходів зносу і демонтажу будівель, координації дій учасників процесу поводження з ними; врахування екологічних аспектів утилізації озброєння та військової техніки. Очевидно, специфічні проблеми поводження з відходами війни мають вирішуватися в руслі європейських і міжнародних підходів до формування економіки замкнутого циклу та сталого розвитку, а також враховуватися при доопрацюванні законопроекту «Про управління відходами», що перебуває на розгляді в парламенті.

### **Список використаних джерел**

1. Національна рада з відновлення України від наслідків війни. URL: [https:// www.kmu.gov.ua/diyalnist/nacionalna-rada-z-vidnovlennya-ukrayini-vid-naslidkiv-vijni](https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/nacionalna-rada-z-vidnovlennya-ukrayini-vid-naslidkiv-vijni) (дата звернення: 11.06.2022).

2. Постанова Кабінету Міністрів України від 19.04.2022 № 473 «Про затвердження Порядку виконання невідкладних робіт щодо ліквідації наслідків збройної агресії Російської Федерації, пов'язаних із пошкодженням будівель та споруд». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/473-2022-%D0%BF#Text> (дата звернення: 11.06.2022).

3. Постанова Кабінету Міністрів України від 19.04.2022 № 474 «Про затвердження Порядку виконання робіт з демонтажу об'єктів, пошкоджених або зруйнованих внаслідок надзвичайних ситуацій, воєнних дій або терористичних актів». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/474-2022-%D0%BF#Text> (дата звернення: 11.06.2022).

4. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо першочергових заходів реформування сфери містобудівної діяльності» від 12.05.2022 № 2254-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2254-IX#Text> (дата звернення: 11.06.2022).

## **СОРБЦІЙНЕ ОЧИЩЕННЯ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНИХ ВОД КИСЛОТНО- ТА МЕХАНОАКТИВОВАНИМ МОНТМОРИЛОНІТОМ**

*Ковальчук І. А.<sup>1,2</sup>, Спасьонова Л. М.<sup>2</sup>, Закутевський О. І.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Інститут сорбції та проблем ендоекології НАН України,

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, [kowalchukiryna@gmail.com](mailto:kowalchukiryna@gmail.com)

The most common technology used for contaminated water purification from trace amount of toxicants is adsorption because its efficiency, flexibility in design and cost effectiveness. The peculiarities of using acid and mechanochemical activation methods to increase the sorption capacity of clay mineral - montmorillonite in relation to heavy metals and radionuclides are considered. Both acid activation and mechanoactivity treatment result in the changes in surface properties of the clay minerals, such as, porosity, meso- and micro structure and distribution of active sites. The adsorption of radionuclides (cesium, strontium, uranium) of both on the acid activated and mechanoactivity montmorillonite is increasing. There is a significant increase in the selectivity of the sorbent for the all radionuclides. Thus, both acid and mechanochemical activation are effective processes to increase the adsorption capacity of clay minerals against heavy metal ions and radionuclides.

В технологіях очищення забруднених вод сорбційний метод очищення використовують для видалення слідових кількостей токсикантів. Застосування природних глинистих мінералів пов'язане з їх доступністю та низькою вартістю. Для підвищення сорбційної здатності глинистих мінералів широко використовують методи фізичного та хімічного модифікування поверхні. Кислотна активація із застосуванням дешевих мінеральних кислот [1], тонке

диспергування із застосуванням енергонапружених агрегатів [2] сприяють підвищенню поверхневої активності глинистих мінералів і, відповідно, збільшенню їх сорбційних характеристик.

Для дослідження використовували глинистий мінерал Черкаського родовища України - монтморилоніт. Кисотно-активовані зразки одержували обробкою монтморилоніту розчинами азотної та соляної кислот при нагріванні. Механохімічну активацію монтморилоніту проводили з використанням планетарного млина впродовж 1 - 8 годин.

В результаті кислотної обробки монтморилоніту змінюється його мезо- та мікропориста структура. У кислотно-активованого монтморилоніту внаслідок часткового розчинення його оксидної структури значно змінюється пористість, відбувається збільшення більше ніж вдвічі питомої поверхні, а також кількості мезо- і частково мікропор. Довготривала обробка монтморилоніту концентрованими розчинами неорганічних кислот при підвищеній температурі призводить до заміщення міжшарових катіонів монтморилоніту на протони  $H^+$ . В подальшому відбувається структурна деградація і вилугування катіонів  $Mg^{2+}$  та, в меншій мірі,  $Al^{3+}$  і  $Fe^{3+}$  із октаедричних сіток мінералу. Кислотна активація монтморилоніту приводить до збільшення його сорбційної здатності щодо катіонів цезію, стронцію та урану. При цьому відбувається значне зростання селективності сорбенту для всіх радіонуклідів. Величини сорбції на кислотно-активованому монтморилоніті зростають для цезію від 0,05 до 1 ммоль/г, стронцію від 0,07 до 0,5 ммоль/г, урану від 0,05 до 0,1 ммоль/г.

Для монтморилоніту при порівняно невеликій за енергією впливу і тривалості механохімічній обробці відбуваються зміни питомої поверхні та пористої структури, що проявляються у деформаціях самих тетраедричних і октаедричних сіток елементарних алюмосилікатних пакетів. Дитригональні лунки кремнекисневих сіток на поверхні глинистих мінералів пропорційні з розмірами великих катіонів лужних металів. Цей фактор є визначальним у підвищеній селективності монтморилоніту до іонів цезію. При тонкому диспергуванні відбувається формування «розпушених» бічних граней. При цьому зростає площа легкодоступних для іонів  $^{137}Cs$  ділянок поверхні у міжшаровому просторі мінералів поблизу бічних граней, що приводить до збільшення величин сорбції [2]. Ефективність очищення забруднених вод від іонів  $^{137}Cs$  зростає від 52 % до 99 %, від іонів  $^{90}Sr$  від 80 до 86% на механохімічно активованому протягом 1 год монтморилоніті.

Таким чином, як кислотна, так і механохімічна активація є ефективними процесами для збільшення адсорбційної здатності глинистих мінералів щодо іонів важких металів та радіонуклідів.

### Список використаних джерел

1. Komadel, P.; Madejova, J. Acid activation of clay minerals. In Handbook of clay science. 2013, 5, pp 385-409.
2. Корнилович Б.Ю. Структура и поверхностные свойства механохимически активированных силикатов и карбонатов, Наукова думка: Київ, 1994; 127 с.

## АНАЛІЗ НИЗЬКОГО ВИТОКУ ПОВІТРЯ ЗА МЕЖІ НБК ТА НА ДІЛЯНЦІ ОБШИВКИ ВЕНТШАХТИ ДСРВ

*Круковський Павло<sup>1</sup>, Склярєнко Дмитро<sup>1</sup>, Дядюшко Євгеній<sup>1</sup>,  
Кондратенко Сергій<sup>2</sup>, Кузьменко Володимир<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України,  
м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а,  
Ел.адреса: kruk\_2@ukr.net

<sup>2</sup>ДСП Чорнобильська АЕС м. Славутич Київської області, Україна 07101,  
Ел.адреса: kondratenko@chnpp.gov.ua

**Annotation.** The article presents the results of the continuation of the previous work [1, 2] using the NSC hydraulic state model developed by the Institute of Technical Thermal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine to analyze the low air outlet outside the NSC and in the section of the casing of the ventilation shaft of the auxiliary systems of the reactor compartment (ASRC). The application of the NSC hydraulic state model based on operational data for 2020-2022 made it possible to verify the leakage areas and obtain the dynamics of changes in the unorganized release of air with radioactive aerosols (low release) from the main volume of the NSC into the environment at an arbitrary wind direction and velocity. According to the obtained scenarios of climatic data, flow rates of ventilation units and RA concentrations in the main volume (MV) of the NSC (Bq/m<sup>3</sup>), the model of the NSC hydraulic state was applied to estimate high release through the NSC ventilation stack and low release under the western, eastern walls of the NSC and at the site outer skin of the ASRC ventilation shaft into the environment. The results show that the low release of air with radioactive aerosols for all scenarios is below the limit values for the monthly release of radioactive aerosols from the NSC (MBq/month). A high release is within the permissible limits of the monthly release of radioactive aerosols from the NSC, with the possibility of further reducing it by reducing the consumption of exhaust air ventilation units from the MV of the NSC by 10%.

Для забезпечення безпеки персоналу, населення та навколишнього середовища Новий Безпечний Конфайнмент (НБК) Чорнобильської АЕС має зовнішню і внутрішню оболонки, які не є абсолютно герметичними. Не абсолютно герметичними є також місця ущільнення під західною та східною стінами НБК і поверхнями будівельних конструкцій, а також самі будівельні конструкції під цими стінами. Витрати організованих потоків повітря (високі викиди) вимірюються, фільтруються і регулюються, в той час як неорганізовані потоки (низькі викиди), які становлять небезпеку для оточуючого середовища, не вимірюються, не фільтруються і слабо регулюються. В НБК є ряд приладів вимірювання перепадів тиску між внутрішніми об'ємами і оточуючим середовищем для контролю і підтримки необхідних тисків в кільцевому просторі (КП) і основному об'ємі (ОО) НБК, але немає приладів для контролю низького викиду повітря крізь західні (ЗЗ) і східні (СЗ) зазори за межі НБК в оточуюче середовище (ОС) (рис.1).

**Метою роботи** є застосування розробленої моделі гідравлічного стану НБК для аналізу значень низького викиду повітря з радіоактивними аерозолями (РА) за межі НБК та на ділянці обшивки вентиляційнопоміжної системи реакторного відділення (ДСРВ) II черги головного корпусу ЧАЕС.

Оснoву комп'ютерної моделі гідравлічного стану НБК складає рівняння Бернуллі, яке видозмінене під потреби розрахунку гідравлічного стану НБК і описана в роботі [1,2], яка за допомогою експлуатаційних вимірювань перепадів тиску і витрат вентиляційних установок дозволяє безперервно визначати витрати повітря як в середину, так і за межі НБК при довільних напрямках і швидкостях повітря, яке обтікає НБК. Вона включає в себе об'єми КП і ОО, 3 зовнішніх зв'язки КП-ОО і 2 зовнішніх зв'язки ОО-ОО, ОО-ДСРВ та 1 внутрішній зв'язок між об'ємами КП і ОО. З урахуванням геометрії об'єкту та відмінностей при обтіканні повітрям окремих складових НБК, зовнішні зв'язки були поділені згідно поверхням, на яких знаходяться місця протічок повітря.



Рис. 1 – Розташування місць протічок повітря з РА в оточуюче середовище (жовтий колір) на фото НБК на східній (а) стороні НБК, а також місця розташування протічок на зовнішній ділянці обшивки вентиляції ДСРВ (б)

Для перевірки точності моделі гідравлічного стану НБК було проведено верифікацію моделі, під час якої розв'язувалися обернені задачі та були розраховані значення площ протічок ОО-ЗЗ  $0,95 \text{ м}^2$ , ОО-СЗ  $3,58 \text{ м}^2$  та КП-ОО  $7,09 \text{ м}^2$  в місцях протічок основного об'єму під стінами НБК та на ділянці обшивки вентиляції ДСРВ. Площа протічок ОО-ДСРВ із основного об'єму НБК в оточуюче середовище на ділянці обшивки вентиляції ДСРВ, де не забезпечено критерій герметизації  $e_{\text{ moy}}=0,001 \text{ м}^2/\text{м}$ , прийнята  $0,349 \text{ м}^2$  [3].

Таким чином для моделювання і виконання оцінки неорганізованого (низького) викиду та організованого (високого) викиду повітря за межі НБК впродовж місяця при різних режимах роботи систем вентиляції, визначених сценаріями ДСП ЧАЕС (див. сценарії 1, 1а і 1б нижче) під час нормальної експлуатації систем вентиляції ОО НБК на ділянці обшивки вентиляції ДСРВ профільованим листом, були використані найгірші з точки зору «низького» викиду напрями та середньорічні швидкості вітру з використанням даних середньорічної рози вітрів,- для 28 днів  $4,2 \text{ м/с}$  та 2 дні  $0 \text{ м/с}$  (штиль). Напрямок вітру для 30 днів

задавався відповідно до ймовірної вірогідності за рік [4], загальна витрата 3-х осушувальних установок для нагнітання в КП 75000 м<sup>3</sup>/год, а для 2-х - 50000 м<sup>3</sup>/год. Ефективність очистки РА НЕРА фільтрами у витяжній системі НБК для сценаріїв 1а, 1б становить 99,99%, а для сценарію 1 (без фільтрів) – 0%.

**Сценарій 1:** режим нормальної експлуатації системи вентиляції ОО без НЕРА фільтрів, ВУ працюють протягом 7 годин на добу аерозольного забруднення  $\leq 40$  Бк/м<sup>3</sup> по  $\beta$ -випромінюючим радіонуклідам

**Сценарій 1а:** режим нормальної експлуатації систем вентиляції ОО з 7-ма НЕРА фільтрами, в КП в роботі 3 осушувальні установки, всі ВУ працюють протягом 7 годин на добу, виконання будівельних робіт з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкту укриття (ОУ), виконання демонтажних робіт при аерозольному забрудненні  $\leq 210$  Бк/м<sup>3</sup>, ВУ припливної вентиляції ОО відключаються, а системи витяжної вентиляції переводяться в аварійний режим.

**Сценарій 1б:** режим нормальної експлуатації систем вентиляції ОО з 7-ма НЕРА фільтрами, в КП в роботі 2 осушувальні установки, аерозольне забруднення під час демонтажу ОУ  $\leq 210$  Бк/м<sup>3</sup> по  $\beta$ -випромінюючим радіонуклідам, ВУ припливної вентиляції ОО і системи витяжної вентиляції такі ж, як в сценарії 1а.

В результаті застосування моделі гідравлічного стану НБК для **сценарію 1** отримано високий викид **3848,3 МБк/міс.**, низький викид, включаючи викид через обшивку вентшахти ДСРВ - **31,93 МБк/міс.** Для **сценарію 1а** отримано високий викид **2,01 МБк/міс.**, низький викид, включаючи викид через обшивку вентшахти ДСРВ - **166,84 МБк/міс.** Для **сценарію 1б** отримано високий викид **2,01 МБк/міс.**, низький викид включаючи викид через обшивку вентшахти ДСРВ - **11,25 МБк/міс.**

**Висновки:** 1. Розроблено модель гідравлічного стану НБК для аналізу і прогнозування неорганізованого повітрообміну НБК з навколишнім середовищем в місцях протікання під стінами НБК і на ділянці обшивки вентшахти ДСРВ при довільному напрямку і швидкості вітру.

2. Застосування моделі за експлуатаційними даними НБК дозволило визначити площі протічок як під стінами НБК, так і на ділянці обшивки вентшахти ДСРВ, а також провести аналіз динаміки зміни витрат при заданих сценаріях роботи вентиляційних установок і радіаційного забруднення основного об'єму НБК.

3. Аналіз розглянутих сценаріїв показав, що викиди повітря з РА не перевищують означених допустимих меж для високого і низького викидів.

### Список використаних джерел

1. Круковський П. Г., Скляренко Д. І., Дядюшко Є. В., Кондратенко С. О. Аналіз неорганізованого повітрообміну Нового Безпечного Конфайнменту з оточуючим середовищем (попередні результати моделювання за експлуатаційними даними) // V міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища» INUDECO, 27–29 квітня, 2020 р., м. Славутич, Україна. – с.109-117.

2. Круковський П. Г., Скляренко Д. І., Дядюшко Є. В., Кондратенко С. О., Кузьменко В. Г. Аналіз і керування низьким викидом повітря із нового безпечного конфайнмента в оточуюче середовище. Збірник матеріалів VI Міжнародної конференції в режимі онлайн «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища», INUDESCO 2021, 27–29 квітня 2021 р., м. Славутич, Україна, с. 137-140.

3. Анализ герметичности основного защитного сооружения НБК на соответствие требованиям проектной документации. Пояснительная записка. 37с.

4. Отчет по анализу безопасности эксплуатации комплекса "НБК-ОУ" Приложение А1 Характеристики промплощадки комплекса НБК-ОУ. Приложение А1. Характеристики промплощадки комплекса НБК-ОУ: (Отчет) / ДАЗВ України ДЕРЖАВНЕ СПЕЦІАЛІЗОВАНЕ ПІДПРИЄМСТВО "ЧОРНОБИЛЬСЬКА АЕС", - 2020,- 21 с.

## **МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ТЕРИТОРІЇ ЗА ТОЧКАМИ-ДЖЕРЕЛАМИ ІНФОРМАЦІЇ**

*Кряжич Ольга*

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН  
України,  
м. Київ, Україна,  
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,  
м. Северодонецьк, Україна,  
economconsult@gmail.com

При розробці способу дослідження екологічного стану території при техногенному забрудненні та апробації програмної реалізації (на що отримано патент України [1] та свідоцтво про авторське право на програмний продукт [2]) з самого початку роботи велися за двома напрямками – дослідження міграції радіоізоотопу водню тритію та розповсюдження хімічних речовин на поверхні ґрунту техногенно навантажених територій. За обома напрямками однією із задач дослідження виступало питання мінімізації точок забору проб, необхідних для отримання даних щодо забруднення території, при підвищенні точності опису території програмним засобом.

Мета роботи: дослідити можливість моделювання розвитку небезпечних ситуацій за окремими точками з достовірною інформацією на певний момент часу.

Досліджуючи у 2013-2015 роках найбільш техногенно навантажені території Луганської і Донецької областей України, було проведено моделювання [3] розвитку можливих вибухопожежних ситуацій великих підприємств хімічної промисловості. Моделювання проводилося за допомогою програмного виробу «Прогнозування та оцінка наслідків катастроф з хімічною речовиною на об'єктах збройних сил України». Додаткові зміни до



моделей вводилися за умов невизначеності, які виникли через початок збройного конфлікту на території зазначених областей.

Наприклад, на території Донецької області з боку різноманітних груп бойовиків-терористів лунали вимоги відвести війська Національної гвардії України, або вони підірвуть наявний на Горлівському казенному хімічному заводі тротил, що призведе до значних руйнацій за межами підприємства, зокрема – на ПАТ «Концерн «Стирол», що спричинить масштабну екологічну катастрофу не лише у регіоні, а й за його межами. Наведена ситуація є чітким прикладом представлення інформації за умов невизначеності – є дані попередніх років про наявність та кількість ЗДОР на ПАТ «Концерн «Стирол» та Горлівському казенному хімічному заводі, супутникова інформація погодних умов в регіоні, та опис ситуації засобами масової інформації. Модель розвитку зазначеної ситуації була побудована на основі інформації з відкритих джерел відносно аварійних ситуацій, що виникали на вказаних об'єктах та за підсумками польових досліджень, що були проведені 20-22 квітня 2012 р. За результатами моделювання представлена візуалізація, на якій сектором визначена зона розповсюдження хмари СДОР.

Сучасне сьогодення додає свої корективи в розуміння актуальності зазначеної теми: ми не знаємо, що відбувається, але можемо прогнозувати на основі того, що є.

Для досягнення поставленої мети при зборі та обробці даних слід забезпечити повноту, несуперечливість і своєчасність інформації, що використовується при моделюванні, що у разі програмної реалізації забезпечить живучість інформаційної системи в часі.

Живучість інформаційної системи можна визначити через категорію релевантності інформації, яка надається, але не просто як її відповідності потребам користувача, а як можливість представити повну та несуперечну інформацію в межах зміни події на часовому відрізку. Врахування викладеного дозволяє досліднику побудувати власний шлях дослідження, який більш підходить для реалізації поставлених задач.

Виходячи з розуміння надійності складної системи, можна вивести розуміння живучої системи як вірогідності, що система виконає свою функцію задовільно (успішно) на відрізку часу  $t + \Delta t$ , з врахуванням можливих змін впливу різноманітних факторів за час  $\Delta t$ . Для побудови моделі життєздатної системи в часі слід розглянути вплив компонентів системи за критерієм «успіх – відмова (невдача)». Індикатор успіху для деякого компоненту – двоїста випадкова змінна  $X_i$ , яка вказує статус компонента, що досліджується.  $X_i = 1$  передбачає компонент системи, який працює успішно,  $X_i = 0$  вказує на компонент системи, який став причиною відмови. Вектор статусу системи – вектор складових індикаторів статусу, який можна побудувати, як:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n).$$

Існує  $2_n$  можливостей реалізації цього вектору в часі для опису життєздатної моделі системи через статус успіху або відмови (невдачі).

Оскільки життєздатність системи може бути представлена як функція часу (і інформації, яка знаходить за цей час), то роботу такої системи доцільно представити як задачу моделювання вірогідності розвитку деякої ситуації в часі.

У якості висновку можна зазначити, що найбільш природнім засобом звуження невизначеності часового інтервалу є поділ його на декілька частин з наступним обчисленням значень цільової функції у вузлах сітки.

Проте, зрозуміло, що система діє не лише на якомусь відрізку часу, а і на певній відстані, відрізку. Особливо це стосується ситуацій, коли обробляється інформація екологічного призначення. Моделюючи екосистему, враховують як час, так і простір, де розвивається та чи інша подія. Звичайно, що не завжди в зазначеній точці система рухатиметься лінійно і рівномірно, які відстані повинні існувати між датчиками (джерелами інформації)  $S_i$ , щоб інформація про систему надходила повною, своєчасною, актуальною, що вимагає ввести до розгляду критерій відстані.

### **Список використаної літератури**

1. Патент України на корисну модель 113110. Спосіб дослідження екологічного стану території при техногенному забрудненні / О. О. Кряжич, О. В. Коваленко // Зареєстровано в державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.01.2017.

2. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 67750 «Комп'ютерна програма з реалізації способу опису забрудненої території «Випадкова точка» («Випадкова точка (Random point)»). Автори: Кряжич О. О., Коваленко О. В. Дата заявки: 12.07.2016. Дата реєстрації: 12.09.2016.

3. Геомоделі в завданнях еколого-економічних оцінок земель: Монографія / С. О. Довгий, Г. Я. Красовський, В. В. Радчук, О. М. Трофимчук та ін. // за ред. С. О. Довгого. – К. ТОВ "Видавництво "Юстон". – 2018. – 256 с.

### ***MODELING THE ECOLOGICAL SITUATION OF THE TERRITORY BY POINTS OF INFORMATION SOURCE***

*O. Kryazhych*

*When developing a method for studying the ecological state of the territory in case of technogenic pollution and testing the program implementation, from the very beginning, work was carried out in two areas – the study of migration of tritium hydrogen radioisotope and the distribution of chemicals on the soil surface of technogenically loaded territories. In both directions, one of the tasks of the study was to minimize the sampling points required to obtain data on contamination of the territory, while improving the accuracy of the territory description by software.*

*The model of the development of the situation was built on the basis of information from open sources regarding emergency situations. Based on the results of modeling, a visualization is presented on which the sector defined the zone of distribution of a cloud of hazardous substances. Now this is gaining more relevance.*

*As a result of the active phase of military aggression on the part of Russia, high-risk objects are destroyed.*

*Dynamic development of the system will require an increase in information sources, and accordingly, information will not only increase statically, but also be checked by comparison from different sources. The most natural way to narrow the uncertainty of a time interval is to divide it into several parts and then calculate the values of the objective function in the grid nodes.*

## **ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕВОДУ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНОГО МЕТАЛУ В ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИЙ СТАН З ВИКОРИСТАННЯМ ВЛАСТИВОСТІ ПРИРОДИ ДО САМОЗАХИСТУ**

*Машиністов Віктор, Балакин Валерій*

Інститут промислових та бізнес технологій Українського Державного університету науки і технологій, проспект Гагаріна 4, 49600, м. Дніпро, nmetau.edu.ua

**Анотація:** Показана принципова можливість переведення радіоактивно забрудненого металу в екологічно безпечний стан. Зазначена проблема вирішується шляхом використання властивості природи до протирадіаційного самозахисту, оскільки закони, яким вона підпорядковується, усувають вплив на людину такого небезпечного фактора, як іонізуюча радіація

Щоб РЗМ став радіаційно безпечним, пропонується його розплавити. В процесі плавлення радіонукліди з поверхні РЗМ переходять в об'єм розплаву. В результаті утворюється тверде закрите джерело іонізуючої радіації, в якому значна її частина поглинається.

Радіаційно-екологічна безпека злитку забезпечується шляхом регулювання кількості гамма-випромінюючих-радionуклідів, що завантажуються в плавильну піч.

Крім того, практично додатково не забруднюється навколишнє середовище, а території й об'єкти, на яких зберігався РЗМ, стають екологічно безпечними.

**Ключові слова:** радіоактивно-забруднений метал, гамма-випромінювання, зовнішнє опромінення.

### **Вступ.**

На сьогодні достатньо гостро стоїть проблема поводження з радіоактивно забрудненим металом (РЗМ), що накопичується при експлуатації радіаційно-ядерних об'єктів, аварій на них, а також у зв'язку з їх демонтажем після вироблення свого ресурсу.

Перевищення показників забрудненості матеріалів відносно допустимого рівня роблять неможливим і їх подальше використання по прямому призначенню. Отже, ці об'єкти повинні виводитися з експлуатації, що в

подальшому потребує вирішення ряду питань відносно їх утилізації, збереження та захоронення. При цьому на всіх етапах поводження з ними необхідно забезпечувати радіаційну безпеку населення та персоналу об'єктів, недопущення додаткового радіоактивного забруднення природного середовища в місцях їх знаходження. При цьому, як показала агресія Росії проти України, необхідно створювати умови, щоб ядерні матеріали були надійно захищені фізично з метою недопущення їх використання для ядерного тероризму.

У відповідності з існуючою на сьогодні практикою, задача забезпечення радіаційної безпеки радіоактивно забруднених об'єктів вирішується шляхом дезактивації поверхонь, на яких знаходяться радіонукліди.

Якщо знизити радіоактивність матеріалів до безпечного рівня неможливо, то вони переводяться в радіоактивні відходи. Вважається, що єдиним кінцевим вирішенням проблеми відходів являється повний природний розпад радіоактивних продуктів, що містяться в них.

Низька ефективність відомих методів знезараження забруднених радіонуклідами матеріалів потребує пошуку нових шляхів до вирішення цієї проблеми. У даній статті представлено розроблений її співавторами підхід до вирішення зазначеної проблеми, який базується на здатності природи до самозахисту, коли її закони усувають небезпечні чинники впливу на життя біологічних об'єктів.

**Основний матеріал.** Предметом даного дослідження є окремі фрагменти твердих металевих виробів, поверхня яких забруднена радіонуклідами. Кожний такий фрагмент має свою форму, геометричні розміри, масу. Створене цими радіонуклідами гамма-випромінювання поширюється в навколишньому середовищі і є додатковим до природного радіаційного фону джерелом опромінення людей.

Іонізуюча радіація невід'ємною складовою існування життя на нашій планеті. Радіонукліди представляють собою елементарні джерела гамма-випромінювання. Вони присутні в кожній точці навколишнього простору, яке, в результаті, представляє собою об'ємне джерело іонізуючої радіації. Відповідно, у кожній точці середовища проживання людини існує сумарне електромагнітне поле, яке формується гамма-випромінюванням, що надходить до неї з усіх напрямків. Основною кількісною оцінкою шкідливого впливу іонізуючого випромінювання (ІВ) на людину є індивідуальна річна ефективна доза зовнішнього опромінення. Ця доза формується ІВ тих радіонуклідів, енергії яких достатню для того, щоб воно проникло в організм людини та іонізувало його атоми і молекули. Вклад у поглинуту дозу індивідумом, що знаходиться в деякій точці на поверхні землі, вносять ті радіонукліди, які знаходяться на відстані від неї не більше декількох сотень метрів в атмосфері, а в землі 0,3-0,4 м. Це означає, що не всі радіонукліди, що знаходяться в середовищі проживання людини, вносять свій вклад в дозу опромінення окремої конкретної особи, а тільки тільки та їх частина, яка знаходиться в безпосередній близькості від неї. Пояснюється це тим, що середовище з об'ємним розподілом радіонуклідів є з одного боку джерелом гамма-випромінювання, а з іншого - це середовище поглинає випромінювання, що

поширюється в ньому. Завдяки цій його властивості не створюються неприйнятно великі індивідуальні дози радіації, що діють на людину.

Таким чином, природа має властивості внутрішнього протирадіаційного самозахисту, оскільки закони, яким підпорядковуються її існування, усувають вплив на людину такого небезпечного фактору, як іонізуюча радіація.

Наочною ілюстрацією здатності природи до самозахисту є сам факт існування життя на Землі, в усіх сферах якої (літосфері, гідросфері, атмосфері і біосфері) міститься велика кількість радіонуклідів. Якби не було поглинання гамма-випромінювання в їхній речовині, то під дією критично високого рівня радіації, створеного всіма цими елементарними випромінювачами, людина, що знаходиться на земній поверхні, не змогла б вижити.

Людина виникла, еволюційно розвивалась, адаптувалась і живе завдяки своїм властивостям пристосовуватись до умов, в яких вона знаходиться на протязі тривалого часу. Зокрема, на людства постійне діє радіаційний фон, рівень якого не залишається строго постійним. Залежно від регіонів природний радіаційний фон може відрізнятись до 10 разів відносно свого середньосвітового значення 0,48 мЗв/рік. Тим не менше, загальновідомо, що опромінення за рахунок радіаційного фону навіть в місцевостях, де він підвищений, не приводить до будь-яких специфічних променевих уражень [1].

Отже, індивідуальна доза опромінення, яка формується природним радіоактивним фоном, є найбільш сприятливою для здоров'я людини, оскільки людський організм пристосувався до неї в процесі своєї еволюції. Є достатньо переконливі дані, які свідчать, що як зменшення, так і збільшення дози опромінення людини призводить до погіршення її здоров'я. Звідси випливає, що природний радіаційний фон може використовуватись як критерій радіаційної безпеки антропогенних джерел іонізуючого випромінювання. Зокрема, для того, щоб при практичній діяльності, яка пов'язана з використанням радіонуклідів природного або штучного походження, протирадіаційний захист був забезпечений, доза додаткового опромінення була співставлена з радіаційним фоном.

Якщо розглядати РЗМ як джерело іонізуючої радіації, то необхідно мати на увазі, що це твердий об'єкт, поверхня якого забруднена радіонуклідами. Тобто це відкрите джерело іонізуючого випромінювання, яке може спричиняти як зовнішнє, так і внутрішнє опромінення людини. Для того, щоб твердий об'єкт був радіаційно безпечним і його можна використовувати без будь-яких обмежень, необхідно, щоб індивідуальна річна ефективна доза опромінення з його поверхні не перевищувала ліміта дози, встановленого законодавством [2,3,4].

У загальному випадку безпечне поводження з будь-якими джерелами ІВ забезпечується як шляхом зменшення кількості випромінюючих радіонуклідів, так і зміною умов поширення створеного ними випромінювання до точки, у якій знаходиться або може перебувати індивідуум.

Саме ці напрямки забезпечення радіаційної безпеки металу реалізуються в технології що базується на плавленні РЗМ [5,6]. У процесі плавлення радіонукліди переходять з поверхні металу в розплав, де активно змішуються. У результаті радіонукліди рівномірно розподіляється в його об'ємі.

Таким же залишається їх розподіл і в виплавленому злитку. Отже відкрите джерело ІВ яким був РЗМ, перетворюється в закриті об'ємне джерело, з якого

радіонукліди не можуть вийти в навколишнє середовище і потрапити в організм людини. За межі злитка може виходити гамма-випромінювання тільки тих радіонуклідів, які знаходяться в поверхневому шарі металу товщиною в кілька сантиметрів. Гамма-випромінювання всіх інших радіонуклідів поглинається в металі повністю, а альфа- і бета-випромінювання взагалі не здатне вийти за межі металевого злитка. Як наслідок, рівень гамма-випромінювання з поверхні виплавленого металу стає багатократно нижче того значення, яке було на поверхні завантаженого в плавильну піч РЗМ.

Необхідний рівень радіаційної безпеки отриманих злитків забезпечується шляхом регулювання кількості гамма- випромінюючих радіонуклідів, що були завантажені в плавильну піч. Подальше поводження з виробами із виплавленого металу не підвищуватиме рівень їхньої радіаційної небезпеки для біологічних об'єктів, тому що об'ємна активність в металі залишається незмінною. Причому безпечні рівні гамма-випромінювання з поверхні готової продукції досягаються при настільки низьких концентраціях радіонуклідів у виплавленому металі, що вони не впливають на його фізичні та хімічні властивості. Таким чином, процес плавлення створює умови для отримання із РЗМ металопродукції, придатної для подальшого використання без будь-яких обмежень.

Отже, поставлена задача переведення РЗМ в екологічно безпечний стан вирішуються завдяки використанню таких природних властивостей металу, як його здатність до плавлення і поглинання ним радіації. В результаті РЗМ як джерело з поверхневим забрудненням радіонуклідами перетворюється в джерело з об'ємним розподілом елементарних випромінювачів, якому притаманні природні властивості протирадіаційного захисту. Попередні оцінки показують, що процес плавлення РЗМ зменшує потужність ефективної дози з поверхні РЗМ у десятки разів [6].

Необхідно підкреслити, що при використанні запропонованого способу отримання із забрудненого радіонуклідами металу радіаційно безпечного практично не виникає додаткового забруднення навколишнього середовища тими радіонуклідами, які переводяться з поверхні металу в його об'єм в процесі плавлення. При цьому території і об'єкти, на яких зберігався РЗМ, також становляться екологічно безпечними, зокрема за рахунок суттєвого зменшення об'ємів радіоактивно забруднених матеріалів.

Як вказано в [4], моніторинг довкілля на його забрудненість радіоактивними речовинами проводиться шляхом вимірювання потужностей доз випромінювання або концентрації радіонуклідів в об'єктах навколишнього середовища. Оскільки виплавлений злиток металу є твердою речовиною, то згідно з визначенням, наданим в [4], він являється закритим джерелом випромінювання.

В цьому випадку дозиметрами контролюється лише потужність індивідуальної дози випромінювання з поверхні злитку. Згідно з [4], якщо закрите джерело не спричиняє перевищення потужності дози в 1 мкЗв/год на відстані 0,1м від будь-якої найближчої поверхні, то вона не розглядається на предмет отримання дозволу та звільнення від регулюючого контролю. Також санітарними правилами [7] встановлено, що тверді матеріали з невідомим

радіонуклідним складом і невідомою питомою активністю не належить до радіоактивних відходів, якщо потужність поглиненої дози, що визначена на відстані 0,1м від їх поверхні, не перевищує значення 1мкГр/год.

**Висновки.** Представлена технологія повернення в господарський обіг великих об'ємів радіоактивно забруднених металів, що основана на їх плавленні. Процес плавлення призводить до радіаційної безпечності отриманого металу, який у подальшому може використовуватися без будь-яких обмежень. Також практично додатково не забруднюється навколишнє середовище, а території і об'єкти, на яких зберігається РЗМ стають екологічно безпечними. Запропонований підхід характеризується високими техніко-економічними показниками.

### **Список літератури**

1. Ильин Л. А. Радиационная гигиена.-М.,2010.-384с.
2. Закон України «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання» від 14.01.98р.
3. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97), Державні гігієнічні нормативи. Київ, 1998. – 135с.
4. Директива Ради 2013/59/EURANOM від 5.12.2013р. «Про встановлення основних норм безпеки для захисту від загроз, зумовлених впливом іонізуючого випромінювання».
5. Балакин В. Ф., Машинистов В. Е., Коверя А. С. Перспективная технология рециклинга радиоактивно загрязненного металла на основе его плавления // Ядерна та радіаційна безпека. – 2018. – № 2 (78). – С. 43-48. №15\98-ВР.
6. Машинистов В. Е. Решение проблемы утилизации радиоактивно загрязненных объектов на основе эффекта самодезактивации / В. Е. Машинистов, В.Ф. Балакин, А.С. Коверя // Екологічні науки. – 2020. – № 28. – С. 173-181. DOI:10.32846/2306-9716/2020.есо.1-28.27.
7. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України №54 від 02.02.2005р.

### ***TECHNOLOGY OF TRANSFER OF RADIOACTIVELY CONTAMINATED METAL INTO AN ENVIRONMENTALLY SAFE STATE USING THE PROPERTIES OF NATURE FOR SELF-PROTECTION***

*Machinists Victor, Balakin Valery*

*Institute of Industrial and Business Technologies of the Ukrainian State University of Science and Technology, 4 Gagarina Avenue, 49600, Dnipro, nmetau.edu.ua*

#### ***Annotation:***

*The fundamental possibility of converting radioactively contaminated metal into an environmentally safe state is shown. This problem is solved by using the properties of nature to radiation self-defense, because the laws to which it is subject,*

*eliminate the impact on humans of such a dangerous factor as ionizing radiation*

*To make the REM radiation safe, it is proposed to melt it. In the process of melting, radionuclides from the surface of the REM pass into the volume of the melt. As a result, a solid closed source of ionizing radiation is formed, in which a significant part of it is absorbed.*

*Radiation and environmental safety of the ingot is ensured by regulating the amount of gamma-emitting radionuclides loaded into the melting furnace.*

*In addition, the environment is practically not additionally polluted, and the territories and objects where REM was stored become ecologically safe.*

**Key words:** *radioactively contaminated metal, gamma radiation, external irradiation.*

## **ФОРМИ ЗНАХОДЖЕННЯ УРАНУ І РАДІОНУКЛІДІВ У ДОННИХ ВІДКЛАДЕННЯХ ПРИМІЩЕНЬ 001/3 І 012/7 НБК – ОБ'ЄКТ «УКРИТТЯ»**

*Одінцов О. О., Паламар Л. А.*

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36- а, Чорнобиль,  
07270, Україна, oodin@ukr.net

Представлені експериментальні данні визначення форм знаходження урану і радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{244}\text{Cm}$  в донних відкладаннях (ДВ) в приміщеннях 001/3 та 012/7 об'єкту "Укриття" (ОУ).

Основна кількість водних потоків в об'єкті «Укриття» збирається в північній частині ОУ в приміщенні 001/3 допоміжних систем реакторного відділення (ДСРВ) на позначці – 2,60 м. В приміщенні 001/3 постійно знаходяться неорганізовані скупчення радіоактивно забрудненої води (РЗВ), їх об'єм по різним оцінкам складає до 270 м<sup>3</sup>. В результаті фізико-хімічних процесів коагуляції, осадження дисперсної фази важко розчинних солей в цих скупченнях води утворюються ДВ, які містять уран і радіонукліди  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{244}\text{Cm}$ . Під шаром води в приміщенні 001/3 знаходяться ДВ в вигляді мулу. Об'єм цих відкладень оцінюється в 65 м<sup>3</sup>. Склад ДВ в основному формується в наслідок наступних процесів:

- деструкція пластифікованого і конструкційного бетону;
- корозія металевих конструкцій;
- осадження колоїдних форм і розчинних продуктів деструкції та корозії;
- осадження органічних сполучень.

В листопаді 2016 р. «Арка» НБК була встановлена в проектне положення над об'єктом «Укриття». Встановлення НБК в проектне положення призвело до змін режиму надходження води в підпокрівельний простір ОУ. В першу чергу було припинено надходження атмосферних опадів. Змінилися умови вентиляції приміщень ОУ та температурно-вологого режиму в ньому. У 2018 році скупчення РЗВ локалізовані в південній частині приміщень 012/5 – 8



басейну - барботера повністю висохли. В результаті висихання РЗВ на підлозі приміщень 012/5 – 8 утворилися високоактивні ДВ. Інформація про дисперсний склад, вмісту урану і питомої активності радіонуклідів у ДВ, які утворилися у приміщеннях на нижніх позначках об'єкту «Укриття», практично відсутні.

Визначення фізико-хімічних форм знаходження урану і радіонуклідів у ДВ, які утворюються в наслідок висихання РЗВ на нижніх позначках об'єкта «Укриття», дозволить визначити міграційні характеристики урану і радіонуклідів. Данні про ступінь розчинності ДВ необхідні для прогнозу щодо перерозподілу урану і радіонуклідів у випадку надходження води у НБК - об'єкт «Укриття».

Мета даної роботи полягала у визначенні фізико-хімічних форм знаходження урану і радіонуклідів в донних відкладеннях приміщення 001/3 і донних відкладеннях які утворилися в результаті висихання неорганізованих скупчень РЗВ у приміщеннях 012/5 – 8 об'єкту «Укриття».

Проби ДВ в приміщенні 001/3 відбирали у 2015 – 2017 рр. пробовідбірником через свердловину, яка пробурена в підлозі приміщення, 01/3 на позначці + 1,25 м. Проби донних відкладень (мулу) представляли собою масу темного кольору з характерним запахом і вологістю 65 %, втрати при прожарюванні при 600 °С – 25 %.

Проби ДВ в приміщенні 012/7 відбирали 12.06.2018 р. з підлоги приміщення. Донні відкладення представляли собою пісок характерного жовте – бурого кольору.

Визначення водорозчинних, обмінних, специфічно сорбованих, рухомих та кислото розчинних форм урану і радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  і  $^{244}\text{Cm}$  у ДВ приміщеннях 001/3 і 012/7 виконувалися методом послідовних екстракцій. Схема послідовних обробіток наважок ДВ відповідає загальноприйнятим методикам із деякими змінами, які пов'язані із специфікою об'єкту дослідження та обмеженнями радіохімічних методів визначення вмісту радіонуклідів. Міграційна здатність радіонуклідів асоційованих з донними відкладеннями визначається кількістю водорозчинних, обмінних, карбонатних і рухомих (розчинних в розбавлених кислотах) форм. Для визначення кількості водорозчинних, обмінних, які пов'язані із карбонатами та специфічно сорбованих і кислото розчинних форм урану і радіонуклідів наважки повітряне сухих зразків ДВ послідовно обробляли розчинами різних реагентів. Схема визначення хімічних форм урану і радіонуклідів у ДВ наведена в табл. 1.

Таблиця 1 Схема послідовних екстракцій

Форма знаходження	Реагент
1 Водорозчинна	Дистильована вода (H <sub>2</sub> O)
2 Обмінна	1 моль/л CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> pH 7,0
3 Карбонатна та специфічно сорбована	1 моль/л CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> pH 4,8
4 Рухома	1 моль/л HCl
5 Кислото розчинна	9 моль/л HCl
6 Не розчинний залишок	HNO <sub>3</sub> + HF, після озолення при 600 °С

Вилуговування урану і радіонуклідів виконувалися в статичних умовах при кімнатній температурі на протязі 24 годин при періодичному перемішуванні. Обробку наважок ДВ кожним реактивом виконували послідовно.

У всіх вилуговуючих розчинах та нерозчинному залишку визначали вміст урану і радіонуклідів. Активність гамма випромінюючих радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  визначали  $\gamma$ -спектрометричними вимірюваннями на гамма-спектрометричному комплексі у складі напівпровідникового детектора GL2020R із надчистого германію CANBERRA і 16000-канального амплітудного аналізатора імпульсів CANBERRA. Обробка апаратурних спектрів виконувалася в програмному середовищі GENIE-2000. Вміст урану,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  і  $^{244}\text{Cm}$  визначалася із одної проби вилуговуючих розчинів по іонообмінній методиці, яка дозволяє послідовно виділяти без носія  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{234-238}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  і  $^{244}\text{Cm}$ . Активність  $^{90}\text{Sr}$  визначали  $\beta$ -радіометричними вимірами після радіохімічного виділення по осаджуваній методиці на низько фоновому бета радіометрі УМФ-1500. Активність  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  і  $^{244}\text{Cm}$  визначали  $\alpha$ -спектрометричними вимірами джерел  $^{238}\text{Pu} + ^{239+240}\text{Pu}$  та  $^{241}\text{Am} + ^{244}\text{Cm}$  після радіохімічного виділення на альфа спектрометрі Alpha Duo фірми ORTEC. Ізотопний склад урану розраховували на підставі  $\alpha$ -спектрометричних вимірювань активності  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$  і  $^{238}\text{U}$  після радіохімічного виділення фракції урану. Похибка визначення концентрації урану і об'ємної активності радіонуклідів не перевищувала 10 – 15 %.

Питома активність (Бк/кг) радіонуклідів в повітряне сухих пробах ДВ приміщень 001/3 і 012/7 об'єкту «Укриття» наведена в табл. 2.

Таблиця 2. Питома активність донних відкладень, Бк/кг

Приміщення	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{154}\text{Eu}$	$^{238}\text{Pu}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$	$^{244}\text{Cm}$
001/3	$7,4 \cdot 10^8$	$8,1 \cdot 10^8$	$9,8 \cdot 10^5$	$5,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^6$	$7,3 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^5$
012/7	$5,7 \cdot 10^9$	$6,3 \cdot 10^9$	$4,6 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^6$	$3,9 \cdot 10^7$	$9,8 \cdot 10^5$

Вміст урану в дослідних зразках донних відкладень приміщення 001/3 становив 2,2 – 3,1 г/кг, при вмісті  $^{235}\text{U}$  0,026 – 0,033 г/кг. Масові долі ізоотопів урану складають:  $^{234}\text{U}$  – 0,00016,  $^{235}\text{U}$  – 0,0104,  $^{236}\text{U}$  – 0,0019 и  $^{238}\text{U}$  – 0,988. Вміст урану в досліджених зразках донних відкладень приміщення 012/7 складає  $1,02 \pm 0,26$  г/кг. Масові долі ізоотопів урану складають:  $^{234}\text{U}$  – 0,000159,  $^{235}\text{U}$  – 0,0109,  $^{236}\text{U}$  – 0,00192 і  $^{238}\text{U}$  – 0,987. Ізотопний склад урану у ДВ в цілому відповідає ізоотопному складу урану, опроміненого палива 4-го блоку ЧАЕС із середнім вигорянням.

На рис. 1 показано розподіл радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  по різним фракціям вилуговуючих розчинів у пробах ДВ. Водорозчинні форми  $^{137}\text{Cs}$  складають 2,2 – 2,9 %. Доля обмінних форм  $^{137}\text{Cs}$  складає 46 – 58 %, що свідчить про значні міграційні здібності  $^{137}\text{Cs}$ . Рухливі (розчині в 1 моль/л HCl) форми  $^{137}\text{Cs}$  знаходяться в межах від 20 до 26 %. Кислото розчинні форми  $^{137}\text{Cs}$  складають 5 – 9%. Нерозчинний, після всіх послідовних екстракцій, залишок  $^{137}\text{Cs}$  не перевищує 8%. Слід відмітити, що доля міцно фіксованого  $^{137}\text{Cs}$  у ґрунтах зони відчуження і ДВ водойми охолоджувача ЧАЕС складає 35 – 45 %. Фіксація  $^{137}\text{Cs}$  відбувається за рахунок входження цезію в кристалічну решітку глинистих мінералів, які присутні в ґрунті та ДВ відкритих водойм.

Водорозчинні форми  $^{90}\text{Sr}$  у ДВ приміщенні 001/3 не перевищують 2,5 %. Кількість обмінних форм  $^{90}\text{Sr}$  знаходиться в межах 18 – 28 %. Основна кількість  $^{90}\text{Sr}$  до 66 % знаходиться у вигляді карбонатних сполучень  $\text{SrCO}_3$ , які соосаджуються з важкорозчинними солями макрокомпонентів  $\text{CaCO}_3$  і  $\text{MgCO}_3$ .

На рис. 2 показані форми знаходження у ДВ радіонуклідів  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$  і  $^{154}\text{Eu}$ . Розподіл форм знаходження  $^{238}\text{Pu}$  і  $^{239+240}\text{Pu}$  з урахуванням похибки визначення практично однакове. Сумарна частка водорозчинних і обмінних форм  $^{238,239,240}\text{Pu}$  у ДВ не велика і складає 0,5 – 2%. У слабо кислому середовищі при рН 4,8 (1 моль/л  $\text{NH}_4\text{Ac}$ ) у розчинний стан переходить 20 - 25 %  $^{238,239,240}\text{Pu}$ . Слід відмітити, що плутоній у ДВ приміщень 001/3 і 012/3 знаходиться в основному у вигляді сполучень добре розчинних у 1 моль/л  $\text{HCl}$ , частка яких складає 50 – 55 %. Форми знаходження  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$  і  $^{154}\text{Eu}$  у ДВ з урахуванням похибки визначення однакові (див. рис. 2). Кількість водорозчинних форм  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$  і  $^{154}\text{Eu}$  складає 0,15 – 0,33 %. Обмінні форми  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$  і  $^{154}\text{Eu}$  складають 2 – 4%. Гідрооксиди трьох валентних  $^{241}\text{Am}(\text{OH})_3$ ,  $^{244}\text{Cm}(\text{OH})_3$  і  $^{154}\text{Eu}(\text{OH})_3$  в слабо кислому середовищі краще розчиняються, ніж  $\text{Pu}(\text{OH})_4$ , тому при розчиненні ДВ приміщення 001/3 і 012/7 в 1 моль/л  $\text{NH}_4\text{Ac}$  із рН 4,8 в розчин переходить 40 – 50 %  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$  і  $^{154}\text{Eu}$ . Частка рухомих форм  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$  і  $^{154}\text{Eu}$  в приміщенні 001/3 складає порядка 40 %, а в приміщенні 012/7- 30%.

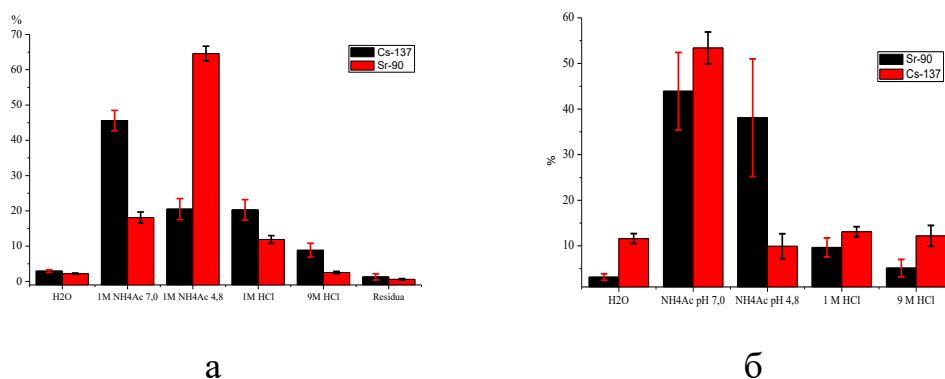


Рис. 1 Форми знаходження  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у донних відкладеннях: а - приміщення 001/3, б – приміщення 012/7

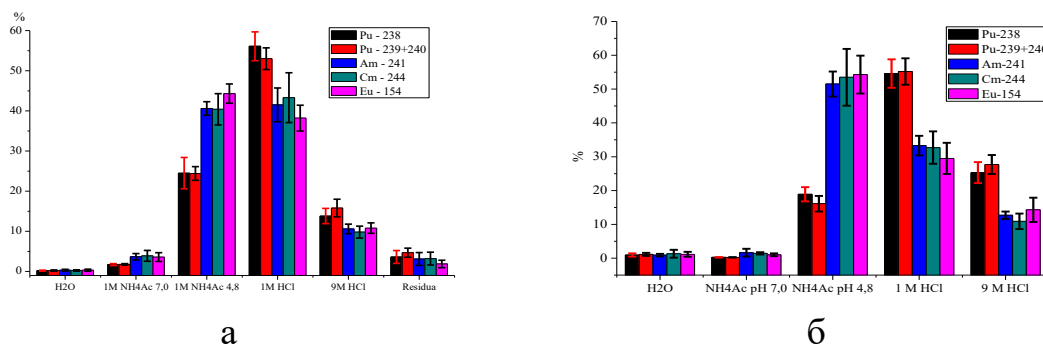


Рис. 2 Форми знаходження радіонуклідів у донних відкладеннях: а - приміщення 001/3, б – приміщення 012/7

Розподіл форм знаходження ізоотопів урану у ДВ приміщеннях 001/3 і 012/7 показано на рис. 3-а та 3-б, відповідно. У ДВ приміщенні 001/3 об'єкта

«Укриття» уран знаходиться у вигляді різних форм. З урахуванням похибки визначення форми надходження  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$  і  $^{238}\text{U}$  практично однакові. Як видно на рис. 3-а кількість водорозчинних сполучень урану не перевищує 1,5 %. Частка обмінних форм урану складає 6 – 8%. Аналогічно плутонію та америцію уран у ДВ знаходиться у вигляді гідроксидів, які добре розчиняються у розбавлених кислотах, частка рухомих форм урану складає 58 – 64 %. Це свідчить про низьку ступінь іммобілізації урану у ДВ і значною ймовірності переносу урану з водними потоками при зміні хімічного складу води об'єкта «Укриття». Кислото розчинні форми урану у ДВ не перевищують 15 %. Частка важко розчинних сполук урану знаходиться в межах від 5 до 12 %. Розподіл форм знаходжень ізотопів урану у ДВ приміщення 012/7 об'єкту «Укриття» показано на рис. 3-б. У ДВ приміщення 012/7 уран знаходиться у вигляді різних форм. Кількість водорозчинних сполук урану складає 2,5 – 3,2 %. Частка обмінних форм урану не велика 1,2 – 1,5%.

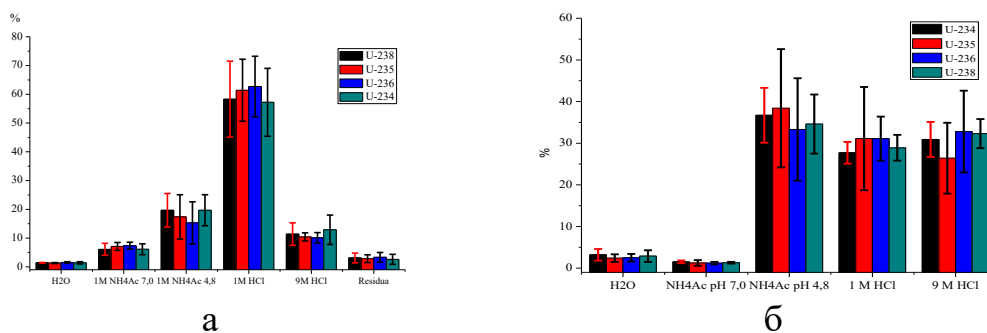


Рис. 3 Форми знаходження ізотопів урану у донних відкладеннях:  
а - приміщення 001/3, б – приміщення 012/7

При обробці ДВ розчином 1 моль/л  $\text{NH}_4\text{Ac}$  при рН 4,8 у розчин переходить 35 – 37 % урану. Уран у ДВ знаходиться у вигляді гідроксидів добре розчинних у розбавлених кислотах, частка рухомих форм урану складає 28 – 32 %. Це свідчить про низьку ступінь іммобілізації урану у ДВ та велику ймовірність переносу урану із водними потоками при зміні хімічного складу води об'єкту «Укриття». В соляній кислоті 9 моль/л розчиняється  $30 \pm 4\%$  урану від сумарного вмісту у ДВ. Із даних, які приведені на рис. 2-б і 3-б видно, що у ДВ приміщення 012/7 уран і трансуранові елементи знаходяться, в основному, у вигляді гідроксили різної ступені «старіння», які добре розчиняються в кислому середовищі починаючи від рН 4,8 і менше. Відмінність знаходження урану і радіонуклідів в ДВ приміщення 012/7 від ДВ приміщення 001/3 в тому що нерозчинний залишок ДВ приміщення 012/7 після всіх обробок практично не вміщує урану і радіонуклідів. На відміну від радіонуклідів у г'рунтах та ДВ водойм зони відчуження радіонукліди асоційованні з ДВ приміщень об'єкту «Укриття» мають значно більшу міграційну здатність.

# **SPECIATION OF URANIUM AND RADIONUCLIDES IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF ROOMS 001/3 AND 012/7 OF THE NSC - SHELTER OBJECT**

*Odintsov Oleksii, Palamar Larisa*

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine,  
Kirova str., 36a, Chernobyl, 07270, Ukraine, oodin@ukr.net*

*After installation of the Arch of New Safe Confinement (NSC) into design position, precipitations intake in the under roof space of the Shelter object ceased, and water evaporation began from the unorganized accumulations of radioactively contaminated water. As a result of physical and chemical processes of coagulation and deposition of sparingly soluble salts, bottom sediments, containing uranium and radionuclides, formed. The aim of the work is to determine speciation forms of uranium and radionuclides in the bottom sediments in room 001/3 under the layer of water and room 012/7, which formed due to the drying out of unorganized accumulations of radioactively contaminated water of the NSC - Shelter object. Results of the experimental determination of speciation forms of uranium and radionuclides  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{244}\text{Cm}$  in the bottom sediments of rooms 001/3 and 012/7 of the NSC - Shelter object are presented.*

*An amount of water-soluble, exchangeable and acid-soluble uranium forms, fission products and transuranium elements in the bottom sediments of rooms 001/3 and 012/7 of the NSC - Shelter object was determined by the method of sequential extractions. Activity of  $^{137}\text{Cs}$  was determined by gamma spectrometric measurements. Content of uranium,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{244}\text{Cm}$  in the leaching solutions and insoluble residue was determined by the ion-exchange method.  $^{90}\text{Sr}$  activity was determined by beta-radiometric measurements. Activity of  $^{234,235,236,238}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{244}\text{Cm}$  was determined by alpha-spectrometric measurements of uranium, plutonium and americium sources.*

*The concentration of uranium in the bottom sediments of room 001/3 makes a  $3,1 \pm 0,5$  g/kg. Specific activity  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  in the bottom sediments is within the limits of  $7 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9$  Bq/of kg, and  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  within the limits of  $6 \cdot 10^5 - 8 \cdot 10^6$  Bq/kg. Radionuclides  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$  in the bottom sediments are in different chemical forms that will define their different potential mobility. Uranium and  $^{137}\text{Cs}$  in the bottom sediments of premises 001/3 mainly are in exchange forms. The amount of water-soluble forms of uranium and cesium makes 1 - 3%. Basic amount  $^{90}\text{Sr}$ , more than 50 % is as carbonate soluble in a weak-acid at pH 4,8. More than 60 % of  $^{238}\text{Pu}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$  in the bottom sediments are in acid-soluble forms.*

*The concentration of uranium in the bottom sediments of room 012/7 was  $1.02 \pm 0.26$  mg/g. Abundance content of uranium isotopes is  $^{234}\text{U} - 0.0159$ ,  $^{235}\text{U} - 1.09$ ,  $^{236}\text{U} - 0.192$  and  $^{238}\text{U} - 98.71\%$ . Isotope content of uranium in the bottom sediments, on the whole, corresponds to the isotope content of uranium in the irradiated fuel of the Chornobyl NPP 4th unit with an average burnup. The specific activity of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the bottom sediments of room 012/7 is in the range of  $6 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9$  Bq/kg.*

$^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  specific activity in the bottom sediments is in the range of  $5 \cdot 10^5$  -  $9 \cdot 10^6$  Bq/kg.  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{244}\text{Cm}$  radionuclides in the bottom sediments are in different physical and chemical forms, which determine their potential mobility. Mainly uranium and  $^{137}\text{Cs}$  in the bottom sediments of room 012/7 are in the exchangeable forms. An amount of water-soluble forms of uranium and  $^{137}\text{Cs}$  is about 1.5 - 3%. The main amount of  $^{90}\text{Sr}$ , more than 60% is in the carbonate forms, which are very soluble

in weak acid medium, when pH is 4.8. More than 65% of  $^{238}\text{Pu}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$  in the bottom sediments of room 012/7 are in the acid-soluble forms. Potential mobility of  $^{241}\text{Am}$  in the bottom sediments is notably higher than of plutonium in the soluble state, when pH 4.8, transfer more than 40% of  $^{241}\text{Am}$ . Relations of activities of radionuclides  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{244}\text{Cm}/^{239+240}\text{Pu}$  in the bottom sediments of rooms 001/3 and 012/7 differ significantly from the similar relations in the fuel containing materials of the Shelter object.

## **РІДКІ РАДІОАКТИВНІ ВІДХОДИ В ОБ'ЄКТІ «УКРИТТЯ» - П'ЯТЬ РОКІВ ПІСЛЯ ВСТАНОВЛЕННЯ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТУ**

*Одінцов О. О., Хан В. Е.*

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36- а, Чорнобиль, 07270, Україна, oodin@ukr.net

Представлені нові данні що до скупчень рідких радіоактивних відходів (РРВ) на нижніх позначках об'єкту "Укриття" (ОУ) після п'яти років що минули після встановлення нового безпечного конфайнменту (НБК) в проектне положення. Досліджена динаміка зменшення об'ємів та зміни концентрації макрокомпонентів, урану і об'ємної активності радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  та  $^{241}\text{Am}$  у РРВ НБК-ОУ.

В листопаді 2016 р. арка НБК була встановлена в проектне положення над об'єктом «Укриття». Встановлення НБК в проектне положення призвело до змін вологості і температурного режиму в середині ОУ. В першу чергу було припинено надходження атмосферних опадів. Змінилися умови вентиляції приміщень ОУ. Це призвело до значних змін умов утворень неорганізованих скупчень РРВ в приміщеннях ОУ. До встановлення НБК в приміщеннях об'єкту «Укриття» на позначках нижче + 12,5 м постійно знаходилось, в залежності від сезону, 330 – 350 м<sup>3</sup> РРВ. Основна кількість РРВ приблизно 270 м<sup>3</sup> локалізована у приміщенні 001/3 допоміжних систем реакторного відділення (ДСРВ) на позначці – 2,60 м. В приміщеннях басейна – барботера (ББ) на позначках – 0,65 м і +2,20 м постійно знаходилось 40 – 50 м<sup>3</sup> РЗВ.

Щомісячний моніторинг скупчень РРВ на протязі листопада 2016 - грудня 2021 рр. показав значне зменшення об'ємів води в приміщеннях 009/4, 012/5 – 8, 012/13 – 16, 013/2, 014/2, 017/2, 061/2 і 210/5 – 7. Об'єми скупчень РРВ

регулюються процесами випарювання та конденсації. В північній частині приміщень 012/14 – 16 на позначке + 2,20 м та південній частині приміщення 012/13 – 16 в 2020 р. вода відсутня. Висихання скупчень РРВ відбулося за рахунок випарювання води. Конденсат, який утворюється в літні місяці, не компенсує об'єми води, що випарюється у зимовий час.

В таблиці наведені результати визначення об'ємів РРВ в приміщеннях НБК – ОУ в листопаді 2016 р. і грудні 2021 р. Оціночна кількість РРВ на нижніх позначках ОУ до встановлення НБК складала приблизно 340 м<sup>3</sup>. За п'ять років експлуатації НБК кількість РЗВ знизилась до 265 м<sup>3</sup>.

На рис. 1 наведено розташування міць скупчення РЗВ на плані приміщень ОУ на відмітки 0,00 станом на листопад 2021 року. Як впливає з рис. 1 основні скупчення РЗВ знаходяться в приміщеннях 001/3 та в приміщеннях 012/6 – 8 (північна частини) у напрямках на відмітки мінус 0,95 (рис. 2). В жовтні – листопаді на підлозі приміщень 012/6 – 8 в наслідок утворення конденсаційної вологи з'явилися РРВ. Глибина сіх скупчень не значна і складає 0,2 – 0,5 см. В приміщеннях другого поверху басейна – барботера 012/13 – 16 станом на листопад 2021 р. РРВ відсутні.

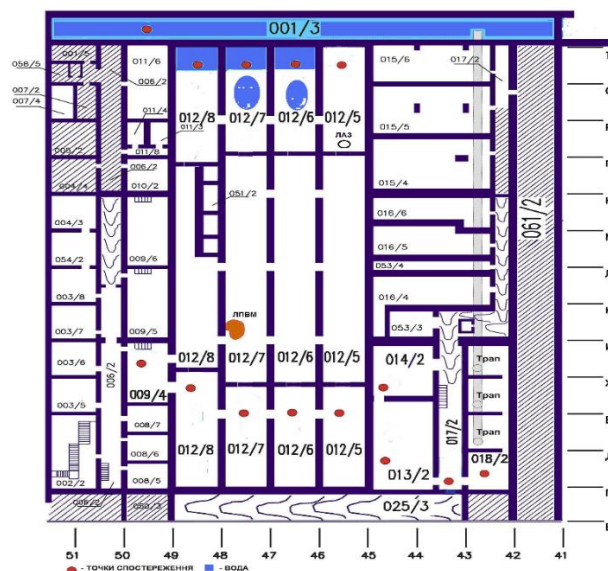


Рис. 1. План розташування скупчень РЗВ в приміщеннях НБК - ОУ на відмітці 0.00.



а



б

Рис.2 Скупчення РЗВ в приміщеннях а - 001/3 і б - 012/6 (північна частина)

На рис. 3 надано динаміку притоку води до приміщення 001/3 з візуально контрольованих джерел – з паророзподільного коридору (ПРК) в приміщення 01/3 точка спостереження 20. В лютому 2021 р. надходження РЗВ з труби в приміщенні 01/3 (т.с. 20) припинилося, можливо внаслідок випаровування води. Починаючи з серпня спостерігалось надходження води в кількості 0,15 – 0,3 дм<sup>3</sup>. Надходження РРВ з труби пов'язане з утворенням конденсаційної вологи внаслідок різниці температур зовні НБК – ОУ і в приміщеннях на нижніх позначках ОУ. Так у липні 2021 р середня температура зовнішнього повітря складала 23,5 °С, а температура в приміщеннях 012/15 та 210/7 становила 15 °С.

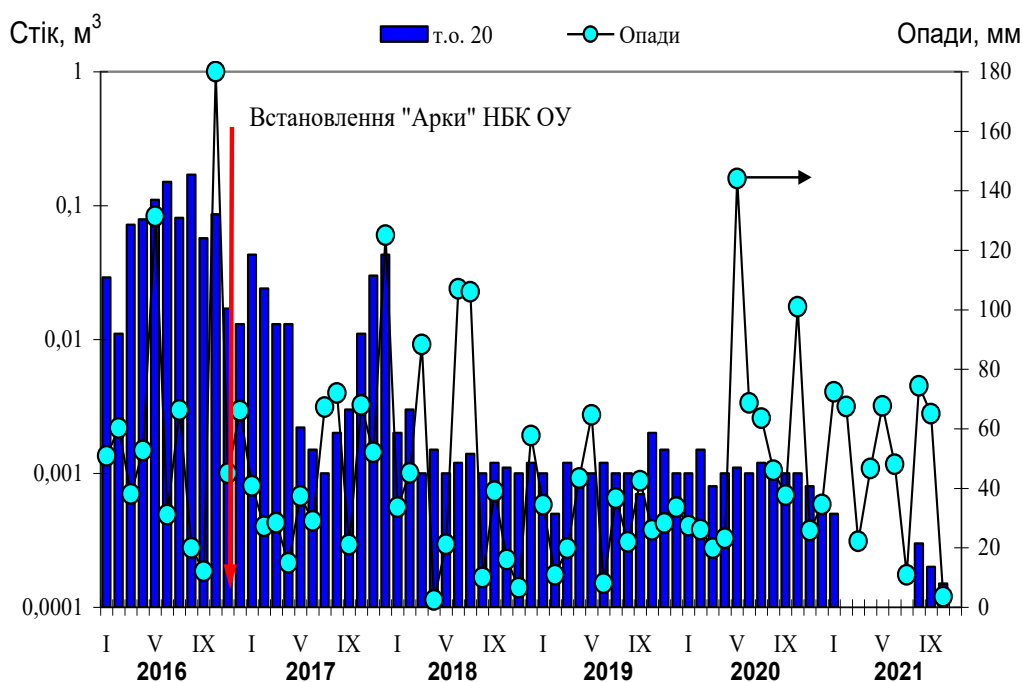


Рис. 3 Динаміка надходження води в приміщення 001/3 з труби з ПРК в період з січня 2016 по листопад 2021 рр.

Таблиця. Об'єми основних водних скупчень в приміщеннях НБК - ОУ

Приміщення	Позначка	Вісь	Ряд	Об'єм води, м <sup>3</sup>	
				2016 р.	2021 р.
012/5 - 8	-0,65	45 - 49	Г - Ж	17,0	0
012/5 - 8	-0,65	45 - 49	П - Т	9,5	5,5
009/4	-0,65	49 - 50	Ж - И	3,2	0
012/13 - 16	2,20	45 - 49	Г - Ж	25,0	0
012/13 - 16	2,20	45 - 49	П - Т	3,1	0
013/2	0,00	44 - 45	Г - Е	1,2	0
014/2	0,00	44 - 45	Ж - И	0,2	0
017/2	0,00	43 - 44	Г - Е	5,4	0
018/2	0,00	42 - 43	Г - И	0,1	0
061/2	6,00	41 - 42	Е - Ж	3,6	0
001/3	- 2,60	41 - 52	У – У <sub>1</sub>	275	262



Динаміка зміни глибин водних скупчень в приміщеннях 009/4, 012/6 (прямки на позначці - 0,95), 012/8, 017/2, 012/13 і 012/16 після встановлення «Арки» НБК в проектне положення показана на рис. 4. В приміщеннях 009/4, 012/8, 017/2 і 012/16 спостерігається зменшення об'ємів водних скупчень до повного висихання.

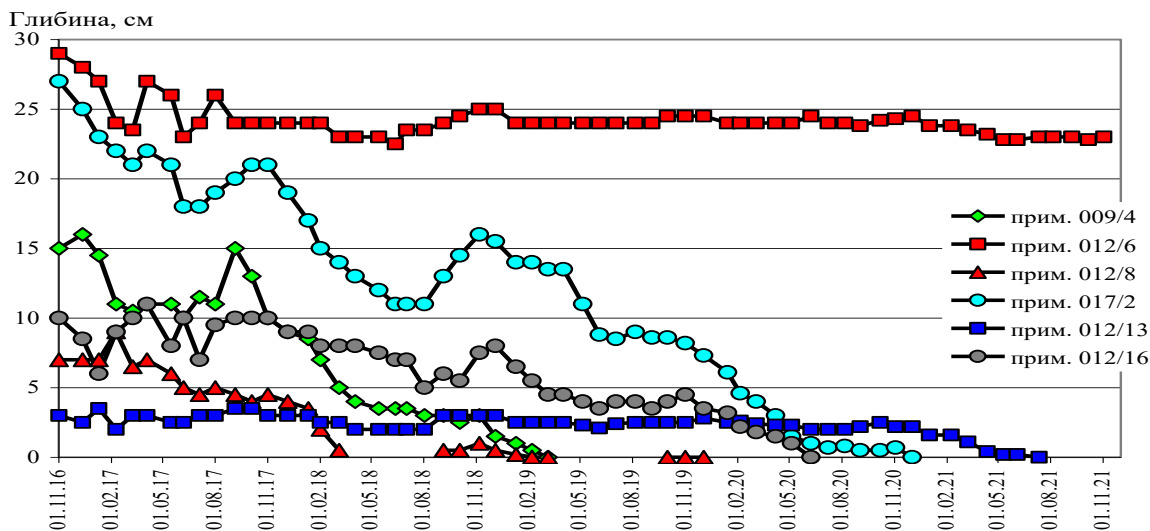


Рис.4 Глибина водних скупчень в приміщеннях НБК – ОУ

На рис. 5 наведена динаміка змін концентрації урану в РРВ у приміщенні 001/3 за період 2016 – 2021 рр. Після встановлення НБК у проектне положення концентрація урану в РРВ приміщення 001/3 знизилась з 10 до 6 г/м<sup>3</sup>.

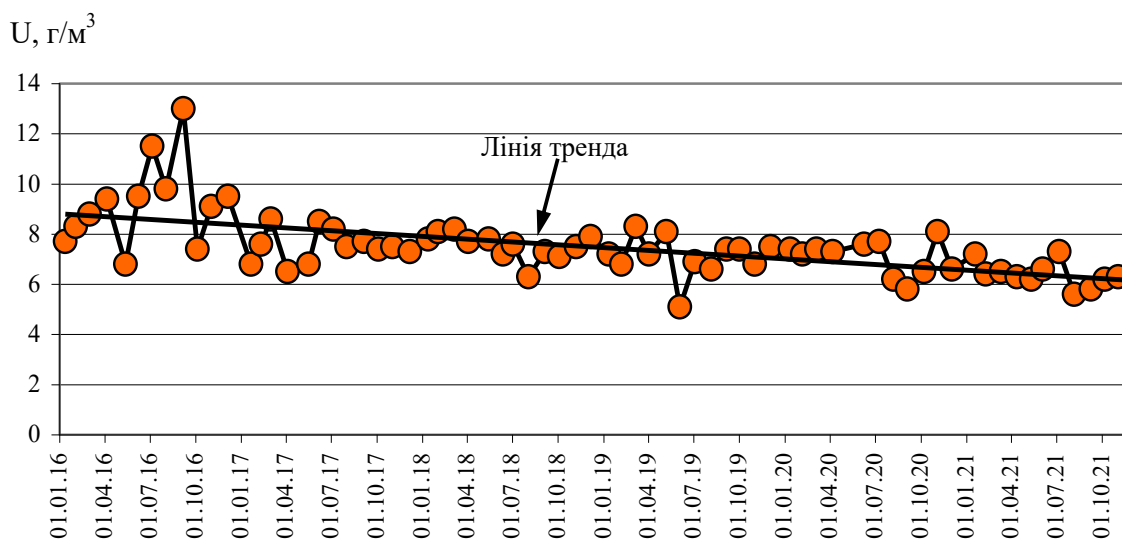


Рис. 5 Концентрація урану в РРВ приміщення 001/3

Як видно на рис. 6, об'ємна активність <sup>137</sup>Cs в РРВ приміщень 001/3 практично не змінюється і знаходиться на рівні  $7 \cdot 10^9 - 1,1 \cdot 10^{10}$  Бк/м<sup>3</sup>. Об'ємні активності <sup>90</sup>Sr, <sup>239+240</sup>Pu і <sup>241</sup>Am у воді приміщення 001/3 з початку січня 2017 р. мають постійний тренд до зменшення і в жовтні 2021 р. становили: <sup>90</sup>Sr – 1,7

·  $10^9$  Бк/м<sup>3</sup>,  $^{239+240}\text{Pu}$  –  $3,3 \cdot 10^5$  Бк/м<sup>3</sup> і  $^{241}\text{Am}$  –  $4,8 \cdot 10^9$  Бк/м<sup>3</sup>. Зниження об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  можливо за рахунок утворення важкорозчинних карбонатів  $\text{SrCO}_3$  і спів осадження їх з карбонатами кальцію  $\text{CaCO}_3$  в умовах сильно лужного середовища в умовах рН 9,2 і концентрацій  $\text{CO}_3^{2-}$  160–190 мг/дм<sup>3</sup>. Зниження об'ємної активності  $^{239+240}\text{Pu}$  і  $^{241}\text{Am}$  ймовірно відбувається за рахунок коагуляції гідроксидів плутонію  $\text{Pu}(\text{OH})_4$  та  $\text{Am}(\text{OH})_3$  і осадження спільно з гідроксидами заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Можливе також надходження води з високим вмістом  $^{137}\text{Cs}$  і низьким вмістом  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  і  $^{241}\text{Am}$ .

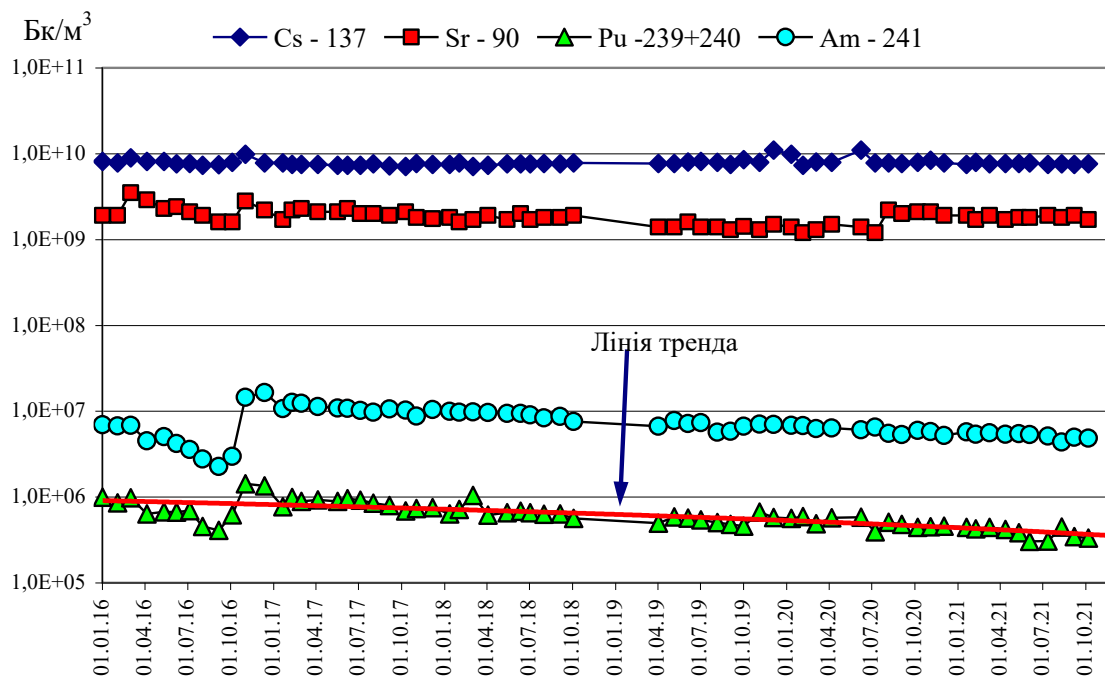


Рис. 6 Об'ємна активність  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  і  $^{241}\text{Am}$  в РРВ приміщення 001/3

Встановлення арки НБК в проектне положення повністю виключила можливість надходження атмосферних опадів в приміщення об'єкту «Укриття». За п'ять років з моменту встановлення НБК в приміщеннях 013/2, 014/2, 017/2, 009/4, 012/5 – 8 і 012/13 – 16 неорганізовані скупчення РРВ повністю висохли. Сумарний об'єм РЗВ на нижніх позначках об'єкту «Укриття» зменшився приблизно на 75 м<sup>3</sup>.

Утворення конденсаційної вологи в літній період істотно не впливає на об'єми скупчень РЗВ.

При випарюванні води відбувається значне (10 – 20 кратне) збільшення концентрації урану, макрокомпонентів і об'ємної активності радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  і  $^{241}\text{Am}$  в скупченнях РРВ.

В приміщеннях 001/3 і 012/6 – 8 (прямки на позначці – 0,95) кількість РРВ за період 2017 – 2021 рр. зменшилося не значно, при цьому концентрація урану та питома активність  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  і  $^{241}\text{Am}$  в скупченнях РРВ теж зменшилися.

## **LIQUID RADIOACTIVE WASTE IN THE “SHELTER” OBJECT 5 YEARS AFTER INSTALLATION OF NEW SAFE CONFINEMENT**

*Odintsov Oleksii, Khan Valeriy*

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine,  
Kirova str., 36a, Chernobyl, 07270, Ukraine, oodin@ukr.net*

*Experimental data on the determination of the volumes and radiation characteristics of liquid radioactive waste (LRW) at the lower marks of the “Shelter” Object 5 years after the installation of the new safe confinement (NSC) in the design position are presented. In the period 2016 - 2021 in the premises 017/2, 012/5 – 8, 012/13 – 16, 009/4, 013/2, 014/2 and 210/5 - 7 the water has dried completely. A decrease in the amount of LRW occurs due to the evaporation of water in the autumn - winter seasons and is not compensated by the formation of condensation moisture in the summer. In December 2021 five years after the installation of the NSC in the design position the LRW were only in the premises 012/6 – 8 and 001/3. As a result of water evaporation, the concentrations of macro components and uranium, as well as the volumetric activities of radionuclides  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154,155}\text{Eu}$ ,  $^{238,239,240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{244}\text{Cm}$  in the LRW increased significantly. The volumetric activities of radionuclides are  $^{90}\text{Sr} - n \cdot 109$ ,  $^{137}\text{Cs} - n \cdot 1010$ ,  $^{154}\text{Eu} - n \cdot 106$ ,  $^{239} + ^{240}\text{Pu} - n \cdot 106$ ,  $^{241}\text{Am} - n \cdot 107$ ,  $^{244}\text{Cm} - n \cdot 105$  Bq / m<sup>3</sup>. As a result of drying out accumulations of radioactively contaminated water, highly active deposits are formed, which are a source of radioactive aerosols in the premises of the Shelter Object.*

## **ХАРАКТЕРСТИКА РАДІАЦІЙНОЇ ОБСТАНОВКИ У ЗОНАХ ВИКОНАННЯ РОБІТ ПО ДЕМОНТАЖУ НЕСТАБІЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБ’ЄКТА «УКРИТТЯ»**

*Павловський Л. І., Єгоров В. В., Хоменко Д. О.*

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а,  
Чорнобиль, 07270, Україна*

У 2021 році почався процес проєктування заходів по демонтажу нестабільних конструкцій об’єкту «Укриття» (ОУ). На першому етапі проєктування були виконані передпроектні дослідження, характеристик радіаційної обстановки у зонах виконання будівельно-демонтажних робіт.

При проведенні досліджень застосовувалися різноманітні методи і способи дозиметричних вимірів, які дозволили виконати роботи у практично недоступних місцях і у зонах де величина потужності дози (ПД) перевищувала 30мЗв/год. Виміри здійснювалися фахівцями ІПБ АЕС НАНУ за допомогою

унікального дозиметричного обладнання і пристроїв, які були придбані, або виготовлені на базі інституту.

У результаті досліджень отримані характеристики радіаційної обстановки на робочих місцях майбутньої діяльності по демонтажу нестабільних конструкцій ОУ.

Обсяг отриманих даних є достатнім для розробки проектних рушень по «ранньому» демонтажу нестабільних конструкцій У процесі проектування можливо з'явиться необхідність уточнення деяких показників радіаційної обстановки.

Радіаційні вимірювання виконані у період з вересня 2021 р. по грудень 2021 р.

**Ключові слова:** дослідження, ПБ АЕС, демонтаж, нестабільні конструкції, величини потужності дози, кутовий розподіл гама-випромінювання, поверхневе радіоактивне забруднення, концентрація радіоактивних аерозолів, комплекс НБК-ОУ.

Станом на початок 2022 року завершено другий етап перетворення об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему, тобто був запроєктований, збудований та зданий в експлуатацію комплекс НБК-ОУ. У результаті проведених робіт ризик радіаційної та екологічної небезпеки об'єкту Укриття», а також комплексу НБК-ОУ у цілому, значно зменшився, проте він ще залишився і є досить значним. Причиною цього, є існуючі нестабільні конструкції ОУ, які були змонтовані у 1986 році. Термін їх експлуатації після виконання заходів по їх стабілізації закінчується у 2025 році. Тобто, уже зараз існують і будуть підвищуватися ризики обвалення нестабільних конструкцій ОУ, що приведе до значного радіаційного забруднення поверхонь всередині конструкції Арки та збільшення викидів радіоактивних аерозолів у атмосферу.

У 2021 році почався процес проектування заходів по демонтажу нестабільних конструкцій об'єкту «Укриття» (ОУ). Перед початком проектування були виконані передпроектні дослідження, характеристик радіаційної обстановки у зонах виконання будівельно-демонтажних робіт. Радіаційні дослідження були проведені фахівцями ПБ АЕС у період із вересня по грудень 2021 року.

Результати радіаційних досліджень будуть використані при розробці технологічних проектних рішень.

Основною метою їх проведення було отримання достатньої кількості вихідних даних для проектування будівельно-демонтажної діяльності в зонах виконання робіт (ЗВР).

При проведенні радіаційних вимірів досліджувалися такі параметри:

- величини потужності дози (ПД) гамма-випромінювання в залежності від конкретних умов.
- кутові розподілення гамма-випромінювання в залежності від конкретних умов;
- характеристики поверхневого забруднення ЗВР;
- об'ємна активність радіонуклідів у повітрі ЗВР.

Радіаційні дослідження здійснювалося у складних радіаційних умовах. По цій причині був прийнятий ряд принципіальних положень, які з одної сторони забезпечили виконання обсягу вимірювань, необхідного для проектування, а з другої – мінімізували дози персоналу.

По отриманим результатам побудовані картограми розподілу потужності дози на загальному виді об'єкта «Укриття» із різних сторін з прив'язкою до конструкцій НБК-ОУ.

По кожній зоні, де розташована нестабільна конструкція, проведений аналіз величин ПД та характеристика їх розподілу.

Результати вимірів величин ПД у ЗВР показують зменшення значень по всім робочим місцям, це обумовлене установкою Арки у проєктне положення, тобто екранування оболонкою арки розсіяного у шарі повітря гамма-випромінювання. Розподілення величин ПД по дослідженим зонам різне. Так, для деяких зон розподілення ПД є практично однорідним, а по другим зонам неоднорідне (величини ПД відрізняються на порядок і більше). Найбільші величини ПД зафіксовані в ЗВР «Накат із труб» у районі блоку «Собачья будка» понад 48 мЗв/год та на завалах над ДЕ понад 35 мЗв/год.

Результати досліджень кутових розподілень гамма-випромінювання дозволяють зробити висновок, про відсутність суттєвих змін розподілу інтенсивності гамма-випромінювання в ЗВР. Поясненням відсутності змін є та обставина, що за період із 2003 року по 2021 рік переміщення масивних конструкцій, які мають екрануючі властивості, всередині ОУ не відбувалися.

Результати досліджень ПЗ вказують на значне збільшення запилення зовнішніх поверхонь покрівлі ОУ. Так, маса пилу на покрівлях ОУ становить  $\sim 15 \text{ г/м}^2$ , а його активність складає від 440 до 580 кБк/кг  $\alpha$ -активних, або від 16150 до 19300 кБк/кг бета- і гамма-активних нуклідів. За питомою активністю, такий пил відповідає критеріям (ОСПУ-2005) першої і третьої групи середньоактивних РАВ. Слід відзначити, під час досліджень поверхневого забруднення частка, що легко знімається з поверхні, досягає 90 % від загального забруднення. Це дає змогу рекомендувати перед початком демонтажних робіт обов'язкове застосування промислових пирососів.

Результати вимірів рівноважної концентрації радіоактивних аерозолів показують, що забруднення повітря у всіх ЗВР не перевищує таких величин: для  $\alpha$  - активних -  $6,2 \text{ Бк/м}^3$ ,  $0,12 \text{ Бк/м}^3$  - для  $\beta$  - активних нуклідів. Винятком є ЗВР у приміщенні машзалу Г438/4, де повітряне середовище характеризується значним запиленням повітря, а саме: по  $\alpha$  - активних -  $4,5\text{E}+02 \text{ Бк/м}^3$ ,  $9 \text{ Бк/м}^3$  - по  $\beta$  - активним нуклідам. Це пояснюється, що у приміщенні Г438/4 є постійні повітряні потоки (можливо конвекція), які провокують підйом радіоактивного пилу у повітря приміщення Г438/4 та взагалі у повітряне середовище машинного залу між осями А-Б, 39-65. Для зниження об'ємної активності радіонуклідів в повітрі приміщення Г-438/4 необхідно провести сеанси місцевого пилопригнічення.

Виходячи із результатів досліджень радіаційних умов, можна констатувати, що обсяг отриманих даних є достатнім для розробки проектних рушень по «ранньому» демонтажу нестабільних конструкцій У процесі

проєктування можливо з'явиться необхідність уточнення деяких показників радіаційної обстановки.

## **CHARACTERISTICS OF THE RADIATION SITUATION IN THE AREAS OF DISMANTLING UNSTABLE STRUCTURES OF THE FACILITY «SHELTER»**

*Pavlovsky L. I., Khomenko D. O., Yehorov V. V.*

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 36a,  
Kirova st., Chornobyl, 07270, Ukraine*

*As of the beginning of 2022, the first stage of transformation of the «Shelter» facility into an environmentally safe system has been completed, ie the NSC-SO Complex has been designed, built and put into operation. As a result of the work carried out, the risk of radiation and environmental safety of the «Shelter» facility, as well as the NSC-SO Complex.complex as a whole, has significantly decreased, but it still remains and is quite significant. The reason for this is the existing unstable structures of the SO, which were installed in 1986.*

*In 2021, the process of designing measures to dismantle unstable structures of the «Shelter» (SO) began. At the first stage of design, pre-design studies, characteristics of the radiation situation in the areas of construction and dismantling works were performed. The results of radiation research will be used in the development of technological design solutions.*

*Various methods and techniques of dosimetric measurements were used in the research, which allowed to perform work in virtually inaccessible places and in areas where the dose rate (DR) exceeded 30 mSv / h. Measurements were carried out by specialists of the ISP NPP NAS of Ukraine using unique dosimetric equipment and devices that were purchased or manufactured on the basis of the institute.*

*As a result of researches the characteristics of a radiation situation on workplaces of the future activity on dismantle of unstable designs of SO are received.*

*The amount of data obtained is sufficient to develop design guidelines for "early" dismantling of unstable structures. In the design process, it may be necessary to clarify some indicators of the radiation situation.*

*Radiation measurements were performed in the period from September 2021 to December 2021.*

**Key words:** *research, ISP NPP, dismantling, unstable structures, dose rate values, angular distribution of gamma radiation, surface radioactive contamination, concentration of radioactive aerosols, NSC-SO complex.*

# INTERPRETATION OF RADIATION-ECOLOGICAL INDICATORS OBTAINED BY USING OF THE “NUVIA” INTEGRATED AUTOMATIC SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL RADIATION MONITORING AND ITS CORRELATION WITH DATA PROVIDED BY THE UKRAINIAN HYDROMETEOROLOGICAL CENTRAL AUDIENCE SERVICE OF UKRAINE FOR EMERGENCY SITUATIONS

*Polyakova Iryna Oleksandrivna<sup>1</sup> (Ph.D.), Stratilat Dmytro Petrovych<sup>2</sup>, Maidannyk Tetyana Petrivna<sup>3</sup>, Budnyk Oksana Petrivna (Ph.D.)<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Deputy Director for Production Affairs of SSE "Radon Association", Kyiv,  
e-mail: polyakova\_ira@ukr.net

<sup>2</sup>Leading Engineer of the Department of Radioactive Waste Management and Research of SSE "Radon Association", Kyiv, e-mail: reactor\_104@ukr.net

<sup>3</sup>Head of the Information Preparation Sector of the Ukrainian Hydrometeorological Center of the SES of Ukraine, e-mail: office@meteo.gov.ua

<sup>4</sup>Junior Researcher of the International "SES" laboratory of the Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
e-mail: fortune567@gmail.com

**Annotation.** The correlation of data obtained from the posts of the “Nuvia” Integrated Automatic System for Environmental Radiation Monitoring (IASERM) of the State Specialized Enterprise "Radon Association" (SSE "Radon Association") and meteorological stations of the Ukrainian Hydrometeorological Center of the State Emergency Service of Ukraine is shown.

The information on the shortcomings revealed during the trial operation of “Nuvia” IASERM located at the radioactive waste storage facilities of SSE "Radon Association" at the Central Manufacturing Area (CMA) (Kyiv), Dnipro interregional branch, Odessa interregional branch, Lviv interregional branch and Kharkiv interregional branch.

The informational data of  $\gamma$ -radiation dose rate and values of volume  $\alpha$ -activity, volume  $\beta$ -activity of «NUVIA» IASERM in the period from 25.02.2022 to 15.04.2022 and  $\gamma$ -radiation dose rate values from UkrHMC meteorological stations are given.

The possibility of using meteorological stations UkrHMC and «NUVIA» IASERM SSE "Radon Association" as a reserve in relation to each other, in case of failure of any posts of radiation - environmental control (application of the principle of interchangeability) has been shown.

**Introduction.** As a result of armed actions in Ukraine, interregional branches and the Central Manufacturing Area of the State Specialized Enterprise "Radon Association" (SSE "Radon Association") have suspended licensing activities related to the processing of radioactive waste (PRW) and transportation of radioactive materials, in addition to monitoring the status of radwaste and the environment, as well as the elimination of radiation accidents and their consequences in Ukraine.

Invasion of the aggressor into the territory of the Exclusion Zone and the zone of unconditional (compulsory) resettlement, including the Chernobyl NPP and Zaporizhzhya NPP (NNEGC "ENERGOATOM"), as well as the shelling of the nuclear installation "Neutron source" based on subcritical assembly controlled by an electron accelerator of the National Science Centre "Kharkiv Institute of Physics and Technology" of the National Academy of Sciences of Ukraine, created a risk of spreading radionuclides outside the facilities and their sanitary protection zones and observation zones.

To obtain operational information and control the radiation situation (dose rate of  $\gamma$ -radiation, values of volumetric  $\alpha$  - activity, volumetric  $\beta$  - activity in the air) and meteorological data at radioactive waste storage facilities (RWSF) of the Central Manufacturing Area (Kyiv), Dnipro interregional branch (Dnipro and region), Odessa interregional branch (Odesa and region), Lviv interregional branch (Lviv and region) and Kharkiv interregional branch (Kharkiv and region) of SSE "Radon Association" connection is carried out with the help of the "Nuvia" Integrated Automatic System for Environmental Radiation Monitoring (IASERM) as it is impossible to get to the facilities for specialists to perform routine work on RWSF in martial law.

## MONITORING OBSERVATIONS AND DATA CORRELATION ANALYSIS

Starting from February 25, 2022, operational control over the radiation parameters of the conditionally "dirty" zone at the RWSF of the Dnipro Interregional Branch (DIB), Lviv Interregional Branch (LIB), Odessa Interregional Branch (OIB), Kharkiv Interregional Branch (KIB) and the the Central Manufacturing Area (CMA) of the SSE "Radon Association" is performed by using the «NUVIA» IASERM.

Figure 1 shows the interface of information data coming from the «NUVIA» IASERM.

Overview	Stations type 2		
Stations type 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gamma probe (BR01)</li> <li>H*(10) 0.13 <math>\mu</math>Sv/h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gamma probe (BR02)</li> <li>H*(10) 0.15 <math>\mu</math>Sv/h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gamma probe (BR03)</li> <li>H*(10) 0.11 <math>\mu</math>Sv/h</li> </ul>
Station type 3 (UB02)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gamma probe (BR04)</li> <li>H*(10) 0.11 <math>\mu</math>Sv/h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gamma probe (BR05)</li> <li>H*(10) 0.11 <math>\mu</math>Sv/h</li> </ul>	
Station type 3 (UB03)	Station type 3 (UB02)	Station type 3 (UB04)	Station type 3 (UB03)
Station type 3 (UB04)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aerosol monitor (BR01)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aerosol monitor (BR01)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aerosol monitor (BR01)</li> </ul>
Station type 4 (UB01)			
Log	<ul style="list-style-type: none"> <li>Air sampler (BR02)</li> <li>Flow 15 m<sup>3</sup>/h</li> <li>Air Volume 3940 m<sup>3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Air sampler (BR02)</li> <li>Flow 0.0 m<sup>3</sup>/h</li> <li>Air Volume 0 m<sup>3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Air sampler (BR02)</li> <li>Flow 15 m<sup>3</sup>/h</li> <li>Air Volume 16906 m<sup>3</sup></li> </ul>
Login	<ul style="list-style-type: none"> <li>Control system</li> <li>Inner Temperature 14.5 °C</li> <li>Inner Humidity 27 %</li> <li>State of Battery Charge 100 %</li> <li>Main supply OK</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Control system</li> <li>Inner Temperature 19.0 °C</li> <li>Inner Humidity 19 %</li> <li>State of Battery Charge 100 %</li> <li>Main supply OK</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Control system</li> <li>Inner Temperature 14.4 °C</li> <li>Inner Humidity 26 %</li> <li>State of Battery Charge 99 %</li> <li>Main supply OK</li> </ul>
	Station type 4 (UB01)	DC/PD Unit (UH03)	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weather Station</li> <li>Temperature 2.2 °C</li> <li>Humidity 66 %</li> <li>Air Pressure 1012.0 hPa</li> <li>Rainfalls 0.0 mm/h</li> <li>Solar Radiation Intensity -128 W/m<sup>2</sup></li> <li>Wind Direction 10m/35m 315 °</li> <li>Wind Speed 10m/35m 4.2 m/s</li> <li>Wind Direction 2m 322 °</li> <li>Wind Speed 2m 3.6 m/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PC</li> <li>CPU 9 %</li> <li>Disc Free Capacity 440.5 GB</li> <li>Free RAM 1.8 GB</li> <li>State of Battery Charge 100 %</li> <li>Main supply OK</li> </ul>	

Figure 1. Example of informational data of  $\gamma$ -radiation dose rate, values of volume  $\alpha$  - activity, volume  $\beta$  - activity in air and meteorological data from IASRM "Nuvia".



Fixed range of values radiation background in the territory of conditionally "dirty" zones of RWR are within:

- CMA -  $0.09 - 0.20 \pm 15\%$   $\mu\text{Sv} / \text{year}$
- DIB -  $0.10 - 0.12 \pm 15\%$   $\mu\text{Sv} / \text{year}$
- OIB -  $0.09 - 0.21 \pm 15\%$   $\mu\text{Sv} / \text{year}$
- LIB -  $0.10 - 0.13 \pm 15\%$   $\mu\text{Sv} / \text{year}$
- KIB -  $0.09 - 0.14 \pm 15\%$   $\mu\text{Sv} / \text{year}$

Values of volume alpha activity  $<0.05 \text{ Bq} / \text{m}^3$ , volume beta activity  $<0.5 \text{ Bq} / \text{m}^3$ . These values do not exceed the levels that were fixed before the start of hostilities.

There were no local points with background values exceeded for the period from February 25, 2022 to April 15, 2022. The release of radionuclides from radwaste storage facilities into the environment does not occur. The state of radiation - ecological situation at DIB, LIB, OIB, KIB and CMA is satisfactory and controlled.

Reporting materials on the state of the radiation situation at the CMA, DIB, LIB, OIB, and KIB of the SSE "Radon Association" are periodically published on the official website of the National Commission for Radiation Protection of the Population of Ukraine [1], and transferred to the SNRCU, the State Exclusion Zone Management Agency of Ukraine and the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine.

Given the fact that access of personnel to the RWSF of the to enterprise SSE "Radon Association" is limited and sometimes impossible during military aggression, there is a need for uninterrupted and stable operation of the radiation control and monitoring system and secure transmission of information data. Approximately in accordance with the abovementioned requirements, the system installed on the RWSF of the enterprises of SSE "Radon Association" is IASERM "Nuvia", which has critically dangerous deficiencies that were identified during the trial operation.

It was found that when the control posts were de-energized IASERM "Nuvia", the normal operation of radiation monitoring devices and meteorological stations will be provided by power plants for less than 2 hours, after which the work of control posts will be suspended until the power supply is restored and equipment is restarted (in the presence of staff). It is not possible to transmit information data via mobile communication periodically and for a long time, also, there are a number of other shortcomings in the work that were identified during the experimental operation of this equipment.

Having experience in the occupation of the Chernobyl Exclusion Zone and the territory of the Chernobyl NPP, due to the power outage of the Automated Radiation Control System (ARCS), in fact, from March 25, 2022, control over the radiation situation was lost [2].

In order to prevent the loss of control over the radiation situation and meteorological data on the RWSF of the CMA, DIB, OIB, LIB, and KIB of the SSE "Radon Association", as well as for the secure transmission of information and use of alternative radiation monitoring systems, specialists of the SSE "Radon Association", together with specialists of the Ukrainian Hydrometeorological Center

of the State Emergency Service of Ukraine (UkrHMC) conducted an analytical study, namely -analysis of information data on dose rate  $\gamma$  - radiation for the period from 25.02.2022 to 15.04.2022 and established correlation between them for the purpose of use meteorological stations UkrHMC and IASERM "Nuvia" as a reserve in relation to each other, in case of failure of any posts of radiation - environmental control (the principle of interchangeability).

The study analyzed data obtained by using of the IASERM "Nuvia", located at the CMA of SSE "Radon Association" in Kyiv (Holosiivskyi district), as well as data provided by UkrHMC in Kyiv (Holosiivskyi district).

Places of independent observation of the radiation situation and meteorological data are given in Figure 2.

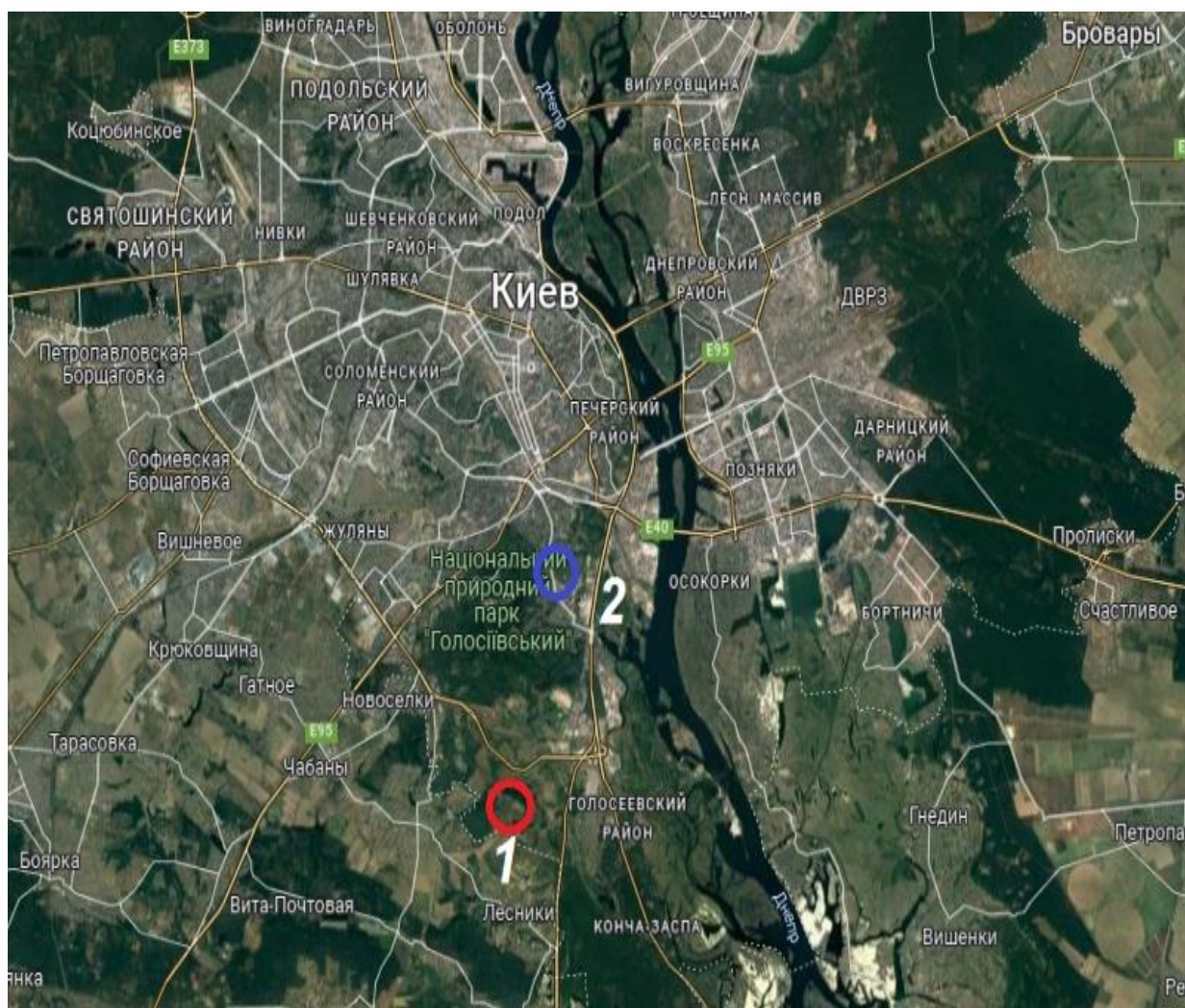


Figure 2. Places of independent observation in the Holosiivskyi district of Kyiv in the period from February 24, 2022, to April 15, 2022

In Figure 2, number 1 indicates the location of the independent location of radiation control and monitoring posts by using «NUVIA» IASERM, the number 2 indicates the location of the meteorological station UkrHMC.

Figure 3 provides information data from the UkrHMC meteorological station in tabular form, indicating the date of measurements, precipitation (mm), and radiation background ( $\mu\text{R} / \text{h}$ ). Systematic and random errors during measurements are 20%.

Date	Rainfall (mm)	Radiation background ( $\mu\text{R} / \text{h}$ )	Date	Rainfall (mm)	Radiation background ( $\mu\text{R} / \text{h}$ )
25.02.22	-	14	22.03.22	-	14
26.02	-	15	23.03	-	12
27.02	0,2	17	24.03	1	14
28.02	-	15	25.03	0,9	15
01.03.22	1,1	16	26.03	0,7	17
02.03	1,0	14	27.03	0,0	15
03.03	0,3	13	28.03	-	15
04.03	0,1	15	29.03	1	13
05.03	-	13	30.03	0,3	15
06.03	0,6	16	31.03	0,7	14
07.03	0,0	15	01.04.22	7	12
08.03	1	16	02.04	4	17
09.03	9	15	03.04	1	13
10.03	0,7	15	04.04	0,0	15
11.03	-	14	05.04	0,3	15
12.03	0,0	15	06.04	-	14
13.03	0,3	16	07.04	-	12
14.03	-	15	08.04	3	10
15.03	-	15	09.04	1	16
16.03	-	16	10.04	0,8	13
17.03	-	14	11.04	0	12
18.03	-	15	12.04	-	13
19.03	-	15	13.04	0,0	13
20.03	-	13	14.04	-	15
21.03	-	13	15.04	-	16

Figure 3. Information data from the meteorological station of UkrHMC (Holosiivskyi district of Kyiv) for the period from 02.25.2022 to 04.15.2022 [3].

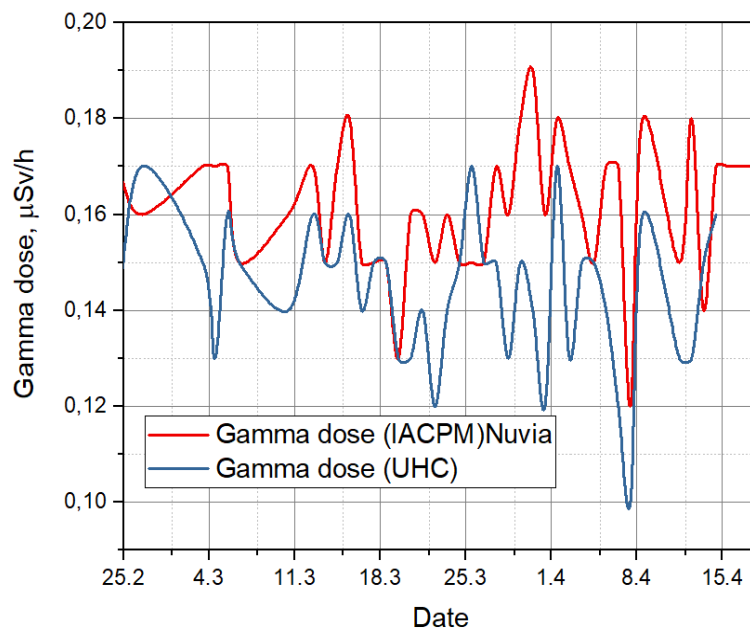


Figure 4. Dose rate  $\gamma$  - radiation obtained with the help of IASRM "Nuvia" and UkrHMC from 25.02.2022 to 15.04.2022

Based on the information data of the radiation control and monitoring posts of the «NUVIA» IASERM, the CMA of the SSE "Radon Association", and the information data of the UkrHMC meteorological station, a graph of  $\gamma$ -radiation dose rate values for the abovementioned period was constructed, as shown in Figure 4.

Figure 4 on the abscissa shows the date of measurements (for example, 25.2 - 25 February 2022, 4.3 - 4 March 2022, 11.3 - 11 March 2022, etc.), on the ordinate axis dose rate  $\gamma$  - radiation ( $\mu\text{Sv} / \text{year}$ ).

The red line indicates the dose rates of  $\gamma$  - radiation provided by the «NUVIA» IASERM, and the blue line - the dose rates of  $\gamma$  - radiation provided from the metrological station UkrHMC.

The obtained data correlate with each other.

**Conclusions.** During martial law to obtain operational information and control the radiation situation ( $\gamma$ -radiation dose rate, values of volumetric  $\alpha$  - activity, volumetric  $\beta$  - activity in the air) and meteorological data at radioactive waste storage facilities (RWSF) of the Central Manufacturing Area (Kyiv), Dnipro interregional branch (Dnipro and region), Odessa interregional branch (Odessa and region), Lviv interregional branch (Lviv and region) and Kharkiv interregional branch (Kharkiv and region) SSE "Radon Association" needs to modernize and upgrade the Nuvia Integrated Automated Radiation Monitoring System.

It is necessary to modernize and upgrade the the "Nuvia" Integrated Automatic System for Environmental Radiation Monitoring.

Available data indicate that in the period from 25.02.2022 to 15.04.2020 no anomalous increase in the dose rate of  $\gamma$ -radiation was recorded in the south-west of Kyiv.

There are no local points with background values exceeded for the period from February 25, 2022 to April 15, 2022. The release of radionuclides from radwaste storage facilities into the environment does not occur. The state of radiation - ecological situation at DIB, LIB, OIB, KIB and CMA is satisfactory and controlled.

To monitor the radiation situation in Kyiv in case of refusals and inability to obtain data from other government agencies, the system "Nuvia" IASERM located on the territory of the CMA of the SSE "Radon Association", can be used as a backup. This function can also be performed by similar systems located on other areas of the SSE "Radon Association".

### References:

1. Official site of the National Commission for Radiation Protection of Ukraine. Access code:<http://nkrzu.gov.ua/>

2. Pollution monitoring in the Chernobyl zone does not work, the latest indicators: exceedance of the norm by 7 times - SAEZ, access code:<https://www.radiosvoboda.org/a/news-monitorynh-chaes-ne-pratsiuie/31778214.html>

3. Information data were provided by the Ukrainian Hydrometeorological Center of the State Emergency Service by Letter to the SSE "Radon Association" (Ex. № 01-18 / 366 dated April 21, 2022).

**ІНТЕРПРИТАЦІЯ РАДІАЦІЙНО-ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ  
ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНТЕГРОВАНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ  
СИСТЕМИ РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ «NUVIA» ТА КОРЕЛЯЦІЯ  
З ДАНИМИ УКРАЇНСЬКОГО ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНОГО ЦЕНТРУ  
ДЕРЖАВНОЇ СЛУЖБИ УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ**

**Полякова Ірина Олександрівна<sup>1</sup> (к.т.н.), Стратілат Дмитро Петрович<sup>2</sup>,  
Майданник Тетяна Петрівна<sup>3</sup>, Будник Оксана Петрівна<sup>4</sup> (к.т.н.)**

<sup>1</sup>Заступник директора з виробничих питань ДСП «Об'єднання «Радон»,  
м. Київ, e-mail: polyakova\_ira@ukr.net.

<sup>2</sup>Провідний інженер управління поводження з радіоактивними відходами та  
наукової діяльності ДСП «Об'єднання «Радон», місто Київ,  
e-mail: reactor\_104@ukr.net.

<sup>3</sup>Завідуюча сектором підготовки інформації Українського  
гідрометеорологічного центру ДСНС, e-mail: office@meteo.gov.ua

<sup>4</sup>молодший науковий співробітник лабораторії Інституту фізики НАН  
України, e-mail: fortune567@gmail.com

**Анотація.** Показано кореляцію даних отриманих з постів інтегрованої автоматизованої системи радіаційного контролю «Nuvia» Державного спеціалізованого підприємства «Об'єднання «Радон» та метеорологічних станцій Українського гідрометеорологічного центру Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

Наведено інформацію щодо недоліків, виявлених під час дослідної експлуатації ІАСРМ «Nuvia», розташованих на пунктах зберігання радіоактивних відходів ДСП «Об'єднання «Радон» на центральному виробничому майданчику (м. Київ), Дніпровській міжобласній філії, Одеській міжобласній філії, Львівській міжобласній філії та Харківській міжобласній філії.

Приведено інформаційні дані потужності дози  $\gamma$  – випромінювання та значень об'ємної  $\alpha$  – активності, об'ємної  $\beta$  – активності ІАСРМ «Nuvia» у період з 25.02.2022 по 15.04.2022 та значень потужності дози  $\gamma$  – випромінювання з метеостанцій УкрЦСМ.

Показана можливість застосування метеорологічних станцій УкрЦСМ та ІАСРМ «Nuvia» ДСП «Об'єднання «Радон» як резервних по відношенню одних до інших, у разі виходу з ладу будь – яких постів радіаційно - екологічного контролю (застосування принципу взаємозамінності).

**Вступ.** В результаті збройних дій в Україні міжобласні філії та центральний виробничий майданчик Державного спеціалізованого підприємства «Об'єднання «Радон» (ДСП «Об'єднання «Радон») припинили ліцензійну діяльність, пов'язану з переробкою радіоактивних відходів (РАВ) та перевезенням радіоактивних матеріалів, окрім моніторингу за станом РАВ і довкілля, а також ліквідації радіаційних аварій та їх наслідків на території України.

Вторгнення агресора на територію Зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення, в тому числі на Чорнобильську АЕС та Запорізьку АЕС (НАЕК «ЕНЕРГОАТОМ»), а також обстріл ядерної установки «Джерело нейтронів, засноване на підкритичній збірці, що керується прискорювачем електронів» Національного наукового центру «Харківський фізико – технічний інститут» НАН України, створило ризик розповсюдження радіонуклідів за межі об'єктів та їх санітарно – захисних зон і зон спостереження.

Для отримання оперативної інформації та контролю за радіаційною обстановкою (потужність дози  $\gamma$ -випромінювання, значень об'ємної  $\alpha$  – активності, об'ємної  $\beta$  – активності у повітрі) й метеорологічних даних на пунктах зберігання радіоактивних відходів (ПЗРВ) центрального виробничого майданчика (м. Київ), Дніпровської міжобласної філії (м. Дніпро та область), Одеської міжобласної філії (м. Одеса та область), Львівської міжобласної філії (м. Львів та область) та Харківської міжобласної філії (м. Харків та область) ДСП «Об'єднання «Радон» проводиться за допомогою Інтегрованої Автоматизованої Системи Радіаційного Моніторингу (ІАСРМ) «Nuvia», оскільки дістатися до об'єктів фахівцям з метою виконання регламентних робіт на ПЗРВ є неможливим в умовах воєнного стану.

### МОНІТОРИНГОВІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ КОРЕЛЯЦІЇ ДАНИХ

Починаючи з 25 лютого 2022 року оперативний контроль за радіаційними параметрами умовно «брудної» зони на ПЗРВ Дніпровської міжобласної філії (ДМФ), Львівської міжобласної філії (ЛМФ), Одеської міжобласної філії (ОМФ), Харківської міжобласної філії (ХМФ) та центральному виробничому майданчику (ЦВМ) ДСП «Об'єднання «Радон» виконується за допомогою ІАСРМ «Nuvia».

На рисунку 1 показано інтерфейс інформаційних даних, що надходять з ІАСРМ «Nuvia».

Overview	Stations type 2		
Stations type 2	Gamma probe (BR01) H*(10) 0.13 $\mu$ Sv/h	Gamma probe (BR02) H*(10) 0.15 $\mu$ Sv/h	Gamma probe (BR03) H*(10) 0.11 $\mu$ Sv/h
Station type 3 (UB02)	Gamma probe (BR04) H*(10) 0.11 $\mu$ Sv/h	Gamma probe (BR05) H*(10) 0.11 $\mu$ Sv/h	
Station type 3 (UB03)			
Station type 3 (UB04)			
Station type 4 (UB01)			
Log	Air sampler (BR02) Flow 15 m <sup>3</sup> /h Air Volume 3940 m <sup>3</sup>	Air sampler (BR02) Flow 0.0 m <sup>3</sup> /h Air Volume 0 m <sup>3</sup>	Air sampler (BR02) Flow 15 m <sup>3</sup> /h Air Volume 16906 m <sup>3</sup>
Login	Control system Inner Temperature 14.5 °C Inner Humidity 27 % State of Battery Charge 100 % Main supply OK	Control system Inner Temperature 19.0 °C Inner Humidity 19 % State of Battery Charge 100 % Main supply OK	Control system Inner Temperature 14.4 °C Inner Humidity 26 % State of Battery Charge 99 % Main supply OK
	Station type 4 (UB01) Weather Station Temperature 2.2 °C Humidity 66 % Air Pressure 1012.0 hPa Rainfalls 0.0 mm/h Solar Radiation Intensity -128 W/m <sup>2</sup> Wind Direction 10m/35m 315 ° Wind Speed 10m/35m 4.2 m/s Wind Direction 2m 322 ° Wind Speed 2m 3.6 m/s	DC/PD Unit (UH03) PC CPU 9 % Disc Free Capacity 440.5 GB Free RAM 1.8 GB State of Battery Charge 100 % Main supply OK	

Рисунок 1. Приклад інформаційних даних потужності дози  $\gamma$ -випромінювання, значення об'ємної  $\alpha$  – активності, об'ємної  $\beta$  – активності у повітрі й метеорологічних даних з ІАСРМ «Nuvia».

Зафіксований діапазон значень радіаційного фону на території умовно «брудних» зон ПЗРВ знаходяться в межах:

- ЦВМ –  $0,09 - 0,20 \pm 15\%$  мкЗв/год
- ДМФ –  $0,10 - 0,12 \pm 15\%$  мкЗв/год
- ОМФ –  $0,09 - 0,21 \pm 15\%$  мкЗв/год
- ЛМФ –  $0,10 - 0,13 \pm 15\%$  мкЗв/год
- ХМФ –  $0,09 - 0,14 \pm 15\%$  мкЗв/год

Значення об'ємної альфа – активності  $< 0,05$  Бк/м<sup>3</sup>, об'ємної бета – активності  $< 0,5$  Бк/м<sup>3</sup>. Дані значення не перевищують рівнів, які фіксувалися до початку бойових дій.

Локальних точок з перевищенням фонових значень за період з 25 лютого 2022 року по 15 квітня 2022 року не виявлено. Виходу радіонуклідів зі сховищ РАВ у довкілля не відбувається. Стан радіаційно – екологічної обстановки на ДМФ, ЛМФ, ОМФ, ХМФ та ЦВМ задовільний і контрольований.

Звітні матеріали про стан радіаційної обстановки на ПЗРВ ЦВМ, ДМФ, ЛМФ, ОМФ та ХМФ ДСП «Об'єднання «Радон» періодично публікуються на офіційному сайті Національної комісії з радіаційного захисту населення України [1], та передаються до Держатомрегулювання, Державного агентства України з управління зоною відчуження та до Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України.

Враховуючи той факт, що доступ персоналу до ПЗРВ підприємств ДСП «Об'єднання «Радон» під час воєнної агресії є обмеженим, а інколи - неможливим, існує необхідність у безперебійній та стабільній роботі системи радіаційного контролю і моніторингу й безпечній передачі інформаційних даних. Наближено відповідаючою вищезазначеним вимогам системою, встановленою на ПЗРВ підприємств ДСП «Об'єднання «Радон» є ІАСРМ «Nivia», що має критично небезпечні недоліки, які було виявлено під час дослідної експлуатації.

Було встановлено, що при знеструмленні постів контролю ІАСРМ «Nivia», нормальна робота приладів радіаційного контролю та метеостанції забезпечуватиметься установками електричного живлення менше ніж на 2 години, після чого робота постів контролю припиняється до моменту відновлення електричного живлення та перезапуску обладнання (за обов'язкової присутності персоналу), передача інформаційних даних за допомогою мобільного зв'язку періодично та довготривало неможлива, також, існує ряд інших недоліків у роботі, що були встановлені під час дослідної експлуатації даного обладнання.

Маючи досвід окупації Чорнобильської зони відчуження та території Чорнобильської АЕС, через знеструмлення автоматизованої системи контролю радіаційної обстановки (АСКРО), фактично з 25 березня 2022 року було втрачено контроль за станом радіаційної обстановки [2].

З метою запобігання втрати контролю за радіаційною обстановкою і метеорологічними даними на ПЗРВ ЦВМ, ДМФ, ОМФ, ЛМФ, ХМФ ДСП «Об'єднання «Радон», а також за безпечною передачею інформаційних даних та використання альтернативних систем моніторингу радіаційної обстановки, спеціалістами підприємства ДСП «Об'єднання «Радон», сумісно з спеціалістами Українського гідрометеорологічного центру Державної служби

України з надзвичайних ситуацій (УкрГМЦ) було проведено аналітичне дослідження, а саме -аналіз інформаційних даних потужності доз  $\gamma$  – випромінювання за період з 25.02.2022 по 15.04.2022 та встановлено кореляцію між ними з метою використання метеорологічних станцій УкрЦСМ та ІАСРМ «Nuvia» як резервних по відношенню одних до інших, у разі виходу з ладу будь – яких постів радіаційно – екологічного контролю (принцип взаємозамінності).

В рамках проведеного дослідження проаналізовано данні, отримані за допомогою ІАСРМ «Nuvia», що знаходиться на ЦВМ ДСП «Об'єднання «Радон» у м. Києві (Голосіївський район), а також дані надані УкрГМЦ у м. Києві (Голосіївський район).

Місяця незалежного спостереження за радіаційною обстановкою та метеорологічними даними надано на рисунку 2.

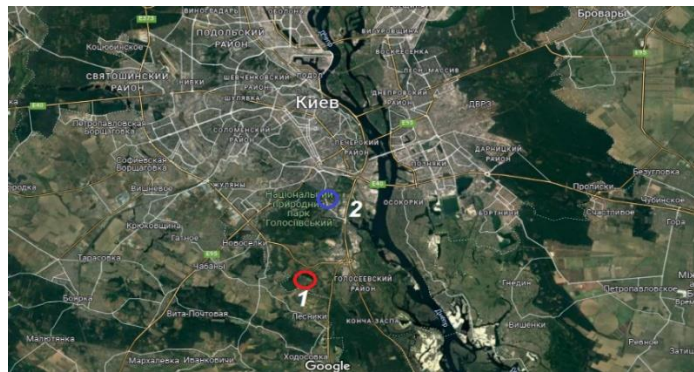


Рисунок 2. Місяця незалежного спостереження у Голосіївському районі м. Києва у період з 24.02.2022 по 15.04.2022

На рисунку 2 цифрою 1 позначено місце незалежного розташування постів радіаційного контролю та моніторингу ІАСРМ «NUVIA», цифрою 2 позначено місце розташування метеорологічної станції УкрЦСМ.

На рисунку 3 надано інформаційні дані з метеорологічної станції УкрЦСМ у табличній формі, де зазначено дату проведення вимірювань, кількість опадів (мм) та радіаційний фон (мкР/год). Систематична та випадкова похибки під час проведення вимірювань становить 20%.

дата	кількість опадів (мм)	радіаційний фон(мкР/год.)	дата	кількість опадів (мм)	радіаційний фон(мкР/год.)
25.02.22	-	14	22.03.22	-	14
26.02	-	15	23.03	-	12
27.02	0,2	17	24.03	1	14
28.02	-	15	25.03	0,9	15
01.03.22	1,1	16	26.03	0,7	17
02.03	1,0	14	27.03	0,0	15
03.03	0,3	13	28.03	-	15
04.03	0,1	15	29.03	1	13
05.03	-	13	30.03	0,3	15
06.03	0,6	16	31.03	0,7	14
07.03	0,0	15	01.04.22	7	12
08.03	1	16	02.04	4	17
09.03	2	15	03.04	1	13
10.03	0,7	15	04.04	0,0	15
11.03	-	14	05.04	0,3	15
12.03	0,0	15	06.04	-	14
13.03	0,3	16	07.04	-	12
14.03	-	15	08.04	3	10
15.03	-	15	09.04	1	16
16.03	-	16	10.04	0,8	13
17.03	-	14	11.04	3	12
18.03	-	15	12.04	-	13
19.03	-	15	13.04	0,0	13
20.03	-	13	14.04	-	15
21.03	-	13	15.04	-	16



Рисунок 3. Інформаційні дані з метеорологічної станції УкрЦСМ (Голосіївський район м. Києва) за період з 25.02.2022 по 15.04.2022 [3].



На основі інформаційних даних постів радіаційного контролю та моніторингу ІАСРМ «Nuvia» ЦВМ ДСП «Об'єднання «Радон» та інформаційних даних метеорологічної станції УкрЦСМ було побудовано графік значень потужності доз  $\gamma$  – випромінювання за вищезазначений період, що показано на рисунку 4.

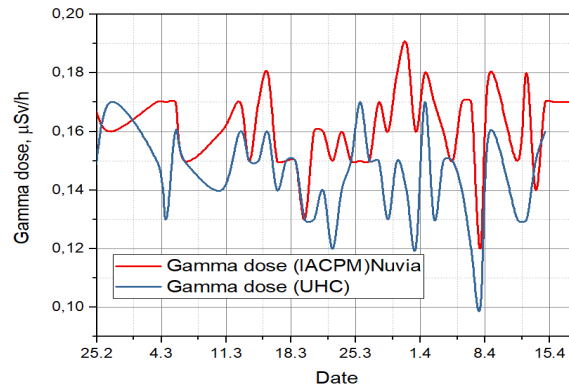


Рисунок 4. Потужності доз  $\gamma$  – випромінювання отримані за допомогою ІАСРМ «Nuvia» та УкрГМЦ з 25.02.2022 по 15.04.2022 р.

На рисунку 4 по осі абсцис покладено дату проведення вимірювань (наприклад 25.2 – 25 лютого 2022 року, 4.3 – 4 березня 2022 року, 11.3 – 11 березня 2022 року і т.д.), по осі ординат потужність дози  $\gamma$  – випромінювання (мкЗв/год).

Червоною лінією позначено потужності дози  $\gamma$  – випромінювання, що надані з ІАСРМ «Nuvia», а синьою лінією - потужності дози  $\gamma$  – випромінювання, що надані з метеорологічної станції УкрЦСМ.

Отримані дані корелюють між собою.

**Висновки.** Під час воєнного стану для отримання оперативної інформації та контролю за радіаційною обстановкою (потужність дози  $\gamma$ -випромінювання, значень об'ємної  $\alpha$  – активності, об'ємної  $\beta$  – активності у повітрі) й метеорологічних даних на пунктах зберігання радіоактивних відходів (ПЗРВ) центрального виробничого майданчика (м. Київ), Дніпровської міжобласної філії (м. Дніпро та область), Одеської міжобласної філії (м. Одеса та область), Львівської міжобласної філії (м. Львів та область) та Харківської міжобласної філії (м. Харків та область) ДСП «Об'єднання «Радон» необхідно провести модернізацію та дооснащення Інтегрованої Автоматизованої Системи Радіаційного Моніторингу ІАСРМ «Nuvia».

Наявні дані свідчать, що у період з 25.02.2022 по 15.04.2020 р. аномального підвищення потужності дози  $\gamma$  - випромінювання на південному заході у м. Києві зафіксовано не було.

Локальних точок з перевищенням фонових значень за період з 25 лютого 2022 року по 15 квітня 2022 року не виявлено. Виходу радіонуклідів зі сховищ РАВ у довкілля не відбувається. Стан радіаційно – екологічної обстановки на ДМФ, ЛМФ, ОМФ, ХМФ та ЦВМ задовільний і контрольований.

Для моніторингу за станом радіаційної обстановки м. Києва у разі відмов та неможливості отримання даних від інших державних установ, система

*ІАСРМ «Nivia», що знаходиться на території ЦВМ ДСП «Об'єднання «Радон», може бути використана як резервна. Також таку функцію можуть виконувати аналогічні системи що знаходяться на інших майданчиках ДСП «Об'єднання «Радон».*

***Літературні посилання:***

*1. Офіційний сайт Національної комісії з радіаційного захисту населення України. Код доступу: <http://nkrzu.gov.ua/>*

*2. Моніторинг забруднення в зоні ЧАЕС не працює, останні показники: перевищення норми в 7 разів – ДАЗВ, код доступу: <https://www.radiosvoboda.org/a/news-monitoring-chaes-ne-pratsiuiie/31778214.html>*

*3. Інформаційні дані надані Українським гідрометеорологічним центром Державної служби з надзвичайних ситуацій Листом до ДСП «Об'єднання «Радон» (Вих. № 01-18/366 від 21.04.2022).*

**CANCER INCIDENCE IN POPULATION OF UKRAINE AFFECTED BY RADIATION IN THE REMOTE PERIOD AFTER THE CHORNOBYL ACCIDENT**

*Prysyazhnyuk A. Ye., Bazyka D. A., Gudzenko N. A., Fuzik M. M., Trotsyuk N. K., Babkina N. G., Khukhrianska O. M., Danevych S. A.*

SI “National Research Center for Radiation Medicine of NAMS of Ukraine”  
anapris@i.ua; mfuzik@gmail.com

**Abstract.** Studies of the long-term oncological consequences of the Chernobyl disaster carried out in Ukraine show a significant impact of radiation exposure on the cancer incidence in the affected population. This is evidenced by the increased radiation risk of leukemia in liquidators, which exceeds national population values, and its value is comparable to the data on hibakusya (Japan), which were subjected to atomic bombings. For the first time in the cohort of participants of emergency works, the radiation association of chronic lymphoid leukemia was established. Radiation risks of leukemia in the children exposed to radiation because of the Chernobyl accident have been noted. A significant increase in the thyroid cancer incidence in children and adults (liquidators, evacuated from the 30-km exclusion zone and residents of the most contaminated areas by radionuclides) was established. There is an excess of breast cancer in women liquidators. Further monitoring of malignant neoplasms in the groups of victims will allow quantifying the radiation risks of specific forms of cancer, radiation-associated manifestations of which are already known from previous studies, or can be expected in the future.

Malignant tumours including leukaemia are the most significant late effects of exposure to ionizing radiation. The main sources for evaluating the risk of malignant neoplasms to occur are studies on the A-bomb survivors in Japan, on populations

exposed due to nuclear tests, and on patients exposed to radiation in medical diagnostics and therapeutic procedures. Results of those studies show heightened level of cancer incidence in exposed groups comparing with background level and suggest dependence of the incidence on medium and high doses of radiation ( $>0.3$  Sv).

Among the major tasks of the National Research Centre for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Science of the Ukraine are the studies of cancer incidence and risk evaluation of malignant neoplasms among the major groups of Ukrainian population affected by radionuclides - clean-up workers, 1986-1987, evacuees from the exclusion zone, as well as the population still living in the most contaminated with radionuclides territories.

The analysis of the cancer incidence in the population affected by the Chernobyl accident is preceded by an assessment of the general demographic and epidemiological situation in Ukraine in terms of life expectancy at birth, level and dynamics of malignancy in the population. There are significant differences in the life expectancy of the population of Ukraine and the European Union. Life expectancy in the European Union is constantly growing. In Ukraine, these figures are much lower. The identified demographic processes affect the health indicators of the population, for example, of the cancer incidence rate that is at highest level in the oldest age groups. Due to the relatively short life expectancy of Ukrainians (especially in men), it is logical to assume a lower frequency rate of cancer.

In this regard, it is very desirable to compare the incidence of malignant neoplasms in Europe and Ukraine. Cancer incidence rates in the population of Ukraine in comparison with the population of Western, Northern and Southern Europe are significantly lower, but close to those of Central and Eastern Europe. In most affected by radionuclides Ukrainian territories there were relatively low frequency of cancer during the observed time period (1980-2019) with moderate increase in 1980-1990. Afterwards, there was registered a decrease until 2006, after which there was a tendency to increase. The cancer incidence in the most contaminated territories and Zhytomyr region residents at whole did not differ significantly during the entire observation period. There was no statistically significant relationship between the average effective doses and the incidence of all forms of malignant neoplasms.

One of the most radiation-associated forms of malignancies with a short latency period (4-5 years) is thyroid cancer. After the Chernobyl accident, its frequency in Ukraine accelerated. The process was mainly due to the six northern regions, which experienced the most significant precipitation of radioactive iodine with average regional doses of more than 35 mGy. The incidence of thyroid cancer is higher than the average in Ukraine in each of the groups of victims: in clean-up workers was 4.5 times higher than expected, in evacuees from exclusion zone - 3.8 times, in residents of radioactively contaminated areas - 1.3 times. It was found not only in children, but also in adolescents and adults. It is expected that the excess thyroid cancer rates due to exposure to radioiodine tend to be increased over time for more than 55 years, mainly for those exposed as young children.

Another group of malignancies that requires special attention after radiation exposure is tumors of the lymphatic, hematopoietic and related tissues. At present time incidence of lymphoma and leukemia in residents of the most heavily contaminated with radionuclides territories does not exceed the national level. However, radiation risks of

leukemia in children exposed to radiation exposure as a result of the Chernobyl accident have been noted. Particular attention is drawn to the group of participants in the liquidation of the Chernobyl accident, which received significant doses of radiation. In this group of victims, the Ukrainian-American epidemiological case-control study confirmed the excess relative risk (ERR/Gy) of leukemia in clean-up workers, which was 2.38 (95 % confidence interval (CI): 0.49–5.87),  $p < 0.004$  in 1986-2006. In the period 1986–2000 - 3.44 (95 % CI: 0.47–9.78),  $p < 0.01$ . In the cohort of participants of emergency works the radiation conditionality of chronic lymphoid leukemia was established. Analysis of breast cancer incidence, which is also considered as a potentially radiogenic form of malignancies, among residents of the most contaminated with radionuclides territories, shows that before the Chernobyl accident breast cancer incidence in these areas was one of the lowest in Ukraine. After that its frequency reached the Zhytomyr region value. There was 1.6 excess of breast cancer incidence among women liquidators compared to the national level.

Because the latency of radiation-induced cancers varies and can extend to very long time periods, special attention should be given not only to thyroid cancer, breast cancer and leukemia, but also to cancers of lung, stomach, colon, ovary, bladder and liver, and to multiple myeloma.

## **ЦЕМЕНТУВАННЯ ІМІТАТИВ РОРВ ГЕОПОЛІМЕРНИМИ ЗВ'ЯЗУЮЧИМИ**

*Розко А. М.<sup>1</sup>, Федоренко Ю. Г.<sup>2</sup>, Злобенко Б. П.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка НАН України, пр. Палладина, 34, Київ-142, 03680

<sup>2</sup>ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України пр. Палладина, 34 а, Київ-142, 03680

Чорнобильська АЕС, енергоблоки якої перебувають у стані зняття з експлуатації, не має будь-яких установок для переробки рідких органічних радіоактивних відходів (РОРВ) і накопичене радіоактивно забруднене масло (головним чином турбінне масло ТП-22) зберігається у сталевих танках у сховищах на площадці станції. РОРВ є одними з найбільш складних видів ядерних відходів і з цих причин вимагає ретельної системи поводження та кондиціонування перед захороненням.

Проект Євратом «PREDIS» у 5 пакеті (WP5), має на меті вирішити проблему РОРВ шляхом дослідження та розробки рішень прямого кондиціонування на основі матеріалів активованих лугом. Це включає вибір можливих змішаних алюмосилікатних систем зв'язування, лужних активаторів та добавок, що полегшують емульгування масла (поверхнево-активні речовини).

Встановлено, що при геополімеризації у присутності масла, яке не зміщується з водою, утворюються компаунди з межею міцності на стиск більше 10 МПа незалежно від способу цементування. При підвищенні у компаундах кількості масла їх міцність поступово спадає. Найбільшу міцність мають зразки на основі матеріалу з високим вмістом СаО – шлаку з додаванням метаколіну

для зменшення можливості утворення тріщин. При різних механізмах геополімерізації, а також враховуючи кристалічні фази у компонентах, які часто виконують функції наповнювачів, відношення у зразках Si/Al; (Na + K)/Al за даними хімічного аналізу може бути різним. Найбільш міцний геополімер на основі шлаку мав відношення Si/Al = 1,55 при; (Na + K)/Al = 0.4 у той же час як геополімер з використанням золи виносу при кращому співвідношенні Si/Al = 1,85 та (Na + K)/Al = 0.5 мав втричі меншу межу міцності.

Цементування водомасляних емульсій у кількості 18,5 % масла, супроводжується утворенням масляної плівки на поверхні зразків і різким падінням межі міцності до 3,2 МПа. При меншій кількості масла межа міцності близько 12 МПа.

Серед усіх можливих варіантів обробки та кондиціонування, які вже були запропоновані для цементування РРОВ, попередня імпрегнація з наступною цементацією була розглянута в цій роботі через її легшу застосування та теоретично більшу досягну навантажувальну здатність. Якщо цементувати тверді адсорбенти насичені маслами, то результат залежить від поглинальної здатності адсорбента та його міцності. Компаунд що містив 20,1 % палигорськіту з 12,3 % масла мав межу міцності на стиск 12,5 МПа, а з 10,1 % спученого вермікуліту і 27,9 % масла - міцність 2,4 МПа.

Для цементування масел найбільш перспективним є застосування шлаколуужних зв'язуючих з додаванням метакаоліну.

Вибір конкретного способу геополімерізації масла безпосередньо переведеного в емульсію чи адсорбованого твердим матеріалом залежить від типу масла, якості компонентів геоматеріалів, економічних та екологічних чинників, які повинні враховуватися при виконанні практичних робіт

## **CEMENTATION OF RLOW SURROGATES WITH GEOPOLYMER BINDERS.**

*A. Rozko<sup>1</sup>, Yu. Fedorenko<sup>2</sup>, B. Zlobenko<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup> Ph.D. (Geology), Senior Researcher in the M. P Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, 34, Palladina av., Kyiv-142, 03680 Ukraine. al.rozko@gmail.com,*

*<sup>2</sup> Researcher SI "Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine", 34a, Palladina av., Kyiv-142, 03680 Ukraine*

*<sup>3</sup> Senior Researcher, SI "Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine", 34a, Palladina av., Kyiv-142, 03680 Ukraine*

*Among all possible treatment and conditioning options, the possibility of direct conditioning of geopolymer binders of technical imitate of oil contaminated with radionuclides is considered in the work. Compounds with a compressive strength of more than 10 MPa has obtained. It is notable that the strength of compounds depends on the quality and composition of geopolymer binders, as well as the amount of oil. Increasing the oil in the compound by direct cementation to 20% reduces the strength of 12 MPa to 3.2 MPa*

*For cementing RLOW, the use of slag-alkali binders with the addition of metakaolin will be more promising. The choice of a specific method of geopolymerization of oil converted into an emulsion or adsorbed by a solid material depends on the type of oil and the quality of the components of geomaterials*

## **ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ARG (ALTERNATE REALITY GAME) ТА RPG (ROLE-PLAYING GAME) ДЛЯ ВІДПРАЦЮВАННЯ НЕСТАНДАРТНИХ СИТУАЦІЙ НА ОБ'ЄКТАХ ЯДЕРНО-ПАЛИВНОГО ЦИКЛУ**

*Рубан Юлія<sup>1</sup>, Сіненко Богдан<sup>2</sup>, Паренюк Олена<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Senior Engineer, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Chornobyl, yuliyaruban24@gmail.com

<sup>2</sup>PhD student, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, bogdan.sinenko@gmail.com

<sup>3</sup>PhD, Senior Researcher, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Chornobyl, rovenahp@gmail.com

**Abstract:** Consideration and analysis of non-standard situations is common in emergency preparedness practice. But most difficult issue is a human factor. In the operation it will be always pose a danger. For a person it is difficult to prepare morally for situations that arise by chance. To solve this problem, it is appropriate to use the practice of ARG and RPG, as it is a generator of random events. And it could help to prepare the operator.

**Ключові слова:** ARG, RPG, навчання

На сьогодні для відтворення процесів ядерної реакції та реактора значний вклад зробили програми візуалізації та моделювання. В підготовці операторів ядерного блоку всі нестандартні ситуації відпрацьовують на спеціально підготовленому тренажерному блоці. Моделювання та відпрацювання сценаріїв, що створюють класичний набір небезпек для населення, є стандартною практикою для запобігання повторення подібних подій у майбутньому.

Але, у випадку, коли відбувається нестандартна ситуація тримати контроль стає надзвичайно важко, оскільки морально людина неготова до перебігу подій. Наприклад, терористичної загрози захоплення блочного щита управління та використання вибухових матеріалів. Людині складно підготуватися морально до ситуацій, що виникають випадково. Для розв'язання представленої проблеми стало доречним використовувати практику ARG та RPG, оскільки вона є генератором випадкових подій [1].

ARG, в перекладі з англійської, означає гру в змінній (доповненій) реальності. Головними особливостями ARG є можливість використовувати та спиратися на існуючі засоби отримання інформації (сайти, книги, смартфони) та динамічний сценарій, що змінюється залежно від дій гравців [2, 3]. Це створює елемент хаотичності та покращує підготовку кадрів до

непередбачуваних подій. На відміну від статично запрограмованої системи, учасник не має уявлення, що відбуватиметься в наступний момент і не може завчасно підготуватися та механічно виконати дію.

RPG, або рольова гра, базується на тому, що учасник бере на себе певну роль з повноваженнями та відповідальністю за дії, котрі призведуть до конкретних наслідків. RPG може бути складовим елементом ARG, але це не обов'язково й може бути використано для ускладнення відпрацювання сценарію [1].

Наразі існує практика проведення навчання персоналу та курсів для підвищення кваліфікації працівників об'єктів ядерно-паливного циклу на базі розроблених ARG. Оскільки, більшість симуляторів та моделювань у віртуальному просторі витрачає багато часу та ресурсів. У той час, як ARG спрощує та здешевлює проведення подібних курсів [3, 4].

Враховуючи вищевказане, ARG та RPG можуть бути використані, як додаткові елементи вже існуючого процесу навчання.

### Список використаних джерел

1. Gurzick, David, Brian Landry, and Kevin F. White. 2010. "Alternate Reality Games and Groupwork." In *Proceedings of the 16th ACM International Conference on Supporting Group Work, GROUP'10*, Sanibel Island, Florida, USA: ACM, 303–4.
2. Hammer, Jessica et al. 2018. *Role-Playing Game Studies Learning and Role-Playing Games*. eds. Sebastian Deterding and José Zagal. New York: Routledge.
3. Holand, Ivar Svare, Peter Mozelius, and Trond Olav Skevik. 2021. "A Structured and Dynamic Model for Emergency Management Exercises." In *Proceedings of the International ISCRAM Conference*, Blacksburg, VA, USA, 186–97.
4. Holand, Ivar Svare, Peter Mozelius, and Trond Olav Skevik. 2022. "Implementation of Emergency Management Exercises as Alternate Reality Games – Students' Perceptions." *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)* 17(06): 181–93.

## CHORNOBYL EXCLUSION ZONE'S CONTAMINATED TERRITORY AS A TERRESTRIAL ANALOGUE OF MARS

*Sinenko Bogdan<sup>1</sup>, Ruban Yuliya<sup>2</sup>, Pareniuk Olena<sup>3</sup>, Gudkov Igor<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>PhD student, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, bogdan.sinenko@gmail.com

<sup>2</sup>Senior Engineer, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Chornobyl, yuliyaruban24@gmail.com

<sup>3</sup>PhD, Senior Researcher, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Chornobyl, rovenahp@gmail.com

<sup>4</sup>Doctor of Biology, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, ingudkov@ukr.net

**Abstract:** The Chornobyl Exclusion Zone (CEZ) is a unique area contaminated with radionuclides after the 1986 Chernobyl accident. The radiation power in some

places reaches high values, approaching similar on the surface of Mars and in space. This allows using the CEZ as a radiation terrestrial analogue of Mars. As well as an experimental test site for the long-term impact of Galactic Cosmic Rays (GCRs) and Solar Energetic Particles (SEPs) on biota and machinery.

**Keywords:** Chernobyl, terrestrial analogue, Mars

**Introduction.** Terrestrial analogues are places on Earth that are similar to other space bodies, such as Mars, Moon, or asteroids [1]. Such places are used as testing grounds for space machinery [2] and mission planning [3]. And also to search for life forms that can exist in the conditions of other planets. The Chernobyl exclusion zone's (CEZ) territories, contaminated with radionuclides, can be one of such places due to the increased radiation background.

**Discussion.** Background ionizing radiation in outer space differs from common terrestrial radiation. Both in terms of power and composition. The radiation background on the Earth's surface was created mainly by radon isotopes and is about 0.27  $\mu\text{Sv/h}$  [4]. The power of ionizing radiation on Mars is on average 8.75  $\mu\text{Gy/h}$  or 26.67  $\mu\text{Sv/h}$  [5] due to the influence of Galactic Cosmic Rays (GCRs), consisting of 85-90% of protons and 10% of helium nuclei [5]. Thus, the average annual dose on Mars is 233.6 mSv, which is almost two orders of magnitude higher than on Earth.

As a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in 1986, the territories adjacent to the plant were contaminated with radionuclides, in particular  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$ . The quality and quantity of contamination vary greatly depending on the location, which allows using them as test grounds with different radiation doses for equipment and biota.

But besides GCRs with relatively constant power, emissions of Solar Energetic Particles (SEPs) occur in space, which are products of the Sun's corona activity. They also consist of protons and helium nuclei. But these releases are difficult to predict, they can last for hours or days, and can lead to high single doses per one event, such as 25  $\mu\text{Gy}$  (25  $\mu\text{Sv}$ ) on the Martian surface [5] and 1.2–19.5 mGy (1.2–19.5 mSv) in space, on the way to it [6].

The study of such short-term doses with a high exposure rate is possible on the Chernobyl exclusion zone's territory but requires work with high-contaminated areas.

The most contaminated place on the territory of the CEZ is the damaged nuclear reactor of the 4th power unit of the Chernobyl nuclear power plant. In its room, there is a certain amount of water in a liquid state, which allows existing of several microorganisms groups [7]. According to data, at a radiation power of 7 to 370 mGy/h, these microorganisms feed on crushed concrete [8], and some exhibit radiotropism and the ability to accumulate melanin, possibly due to the formation of a radiation protection mechanism [7].

Due to the characteristic radionuclide contamination, the data obtained on the territory of the CEZ can be correlated with the results of other GSRs and SEPs impact studies. In particular, in experiments using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  as emitters of ionizing radiation [9].



**Conclusion.** The Chernobyl exclusion zone is a unique area, with sites that have a different stages of radionuclide contamination. Due to the chronically raised background of certain places, it can be considered the Mars surface radiation conditions terrestrial analogue. The conditions in these territories, in particular, the availability of road infrastructure and a number of research institutions, make it possible to conduct high-quality

## References

1. Baker, Victor R. 2014. "Terrestrial Analogs, Planetary Geology, and the Nature of Geological Reasoning." *Planetary and Space Science* 95: 5–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2012.10.008>.
2. Yingst, R. A. et al. 2014. "Testing Mars Exploration Rover-Inspired Operational Strategies for Semi-Autonomous Rovers on the Moon II: The GeoHeuristic Operational Strategies Test in Alaska." *Acta Astronautica* 99(1): 24–36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.01.019>.
3. Eppler, Dean et al. 2013. "Desert Research and Technology Studies (DRATS) 2010 Science Operations: Operational Approaches and Lessons Learned for Managing Science during Human Planetary Surface Missions." *Acta Astronautica* 90(2): 224–41.
4. Ojovan, M. I., W. E. Lee, and S. N. Kalmykov. 2019. "Background Radiation." In *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation (Third Edition)*, eds. Michael I. Ojovan, William E. Lee, and Stepan N. Kalmykov. Elsevier, 47–55. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081027028000054>.
5. Hassler, Donald M. et al. 2014. "Mars' Surface Radiation Environment Measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover." *Science* 343(6169): 1–11.
6. Zeitlin, C. et al. 2013. "Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory." *Science* 340(6136): 1080–84.
7. Zhdanova, Nelli N, Valentina A Zakharchenko, Valeriya V Vember, and Lidiya T Nakonechnaya. 2000. "Fungi from Chernobyl: Mycobiota of the Inner Regions of the Containment Structures of the Damaged Nuclear Reactor." *Mycological Research* 104(12): 1421–26.
8. Pareniuk, O. J., O. V. Moshynets, L. V. Tytova, and S. E. Levchuk. 2013. "Qualitative Composition of Dominating Forms of Microorganisms Isolated from Radionuclide Contaminated Soil and Their Ability to Accumulate  $^{137}\text{Cs}$ ." *Microbiol. J* 75(1): 33–40.
9. Sinenko, Bogdan, Volodymyr Illienko, and Viktor Schwartz. 2019. "Particularities of Pea (*Pisum Sativum* L.) Growth on MR-2.2 Martian Regolith Simulation under Low Doses of Ionizing Radiation." In *9th International Youth Science Forum "Litteris et Artibus"*, Lviv: Lviv Polytechnic National University, 248–51

# СТРУКТУРА І ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПІДСИСТЕМИ АНАЛІЗУ ЩІЛЬНОСТІ ПОТОКУ НЕЙТРОНІВ ВІД КОНТРОЛЬОВАНИХ ПАЛИВОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Скітер Ігор<sup>1</sup>, Савельєв Максим<sup>2</sup>, Деренговський Валерій<sup>3</sup>,  
Дорошенко Анатолій<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль,  
i.skiter@ispnpp.kiev.ua

<sup>2</sup>Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль,  
m.saveliev@ispnpp.kiev.ua

<sup>3</sup>Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль,  
v.derengovsky@ispnpp.kiev.ua

<sup>4</sup>Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль,  
a.doroshenko@ispnpp.kiev.ua

The information subsystem of neutron flux density analysis from controlled fuel-containing materials in the new safe confinement - Shelter object (NSC-SO) integrated automated control system will increase the efficiency and cost-effectiveness of operational diagnostics and decision-making, increase the overall level of nuclear safety. Implementation of the task of creating a subsystem involves the use of adequate mathematical models for the analysis of time series of neutron flux density (NFD), computational methods and algorithms for processing the results of the analysis. The proposed algorithm for solving the tasks includes procedures for pre-processing of dynamic data series of observations of NFD, testing of data series for anomalous data, trend analysis: testing for exponentiality and determining fractal properties and determining autocorrelation properties of data series - analysis of mutual influence of NFD different time points or intervals. The proposed algorithm can be the basis for the creation of appropriate software for nuclear safety diagnostic systems, decision support systems, systems for forecasting the state of nuclear power plants objects.

В роботі [1] наголошується на необхідності зміни принципів побудови систем контролю та діагностики динаміки станів ядерно-небезпечних об'єктів. Основний напрям - створення засобів автоматичної діагностики, здатних виявляти початкові фази потенційно небезпечних аномальних подій в режимі реального часу. Інформаційна підсистема аналізу щільності потоку нейтронів від контрольованих паливовмісних матеріалів у складі комплексної автоматизованої системи управління НБК-ОУ дасть змогу підвищити ефективність та економічність оперативної діагностики та прийняття рішень, підвищити загальний рівень ядерної безпеки. Реалізація поставленої задачі створення підсистеми передбачає використання адекватних математичних моделей аналізу динамічних рядів щільності потоку нейтронів (ЩПН), обчислювальних методів та алгоритмів обробки отримуваних результатів аналізу.

Запропонований алгоритм розв'язку поставлених задач включає в себе процедури попередньої обробки динамічних рядів даних спостережень за ЩПН [2], тестування рядів даних на наявність аномальних даних [3],

трендовий аналіз: тестування на експоненціальність та визначення фрактальних властивостей та визначення автокореляційних властивостей рядів даних – аналіз взаємного впливу ЩПН в різні часові моменти чи інтервали.

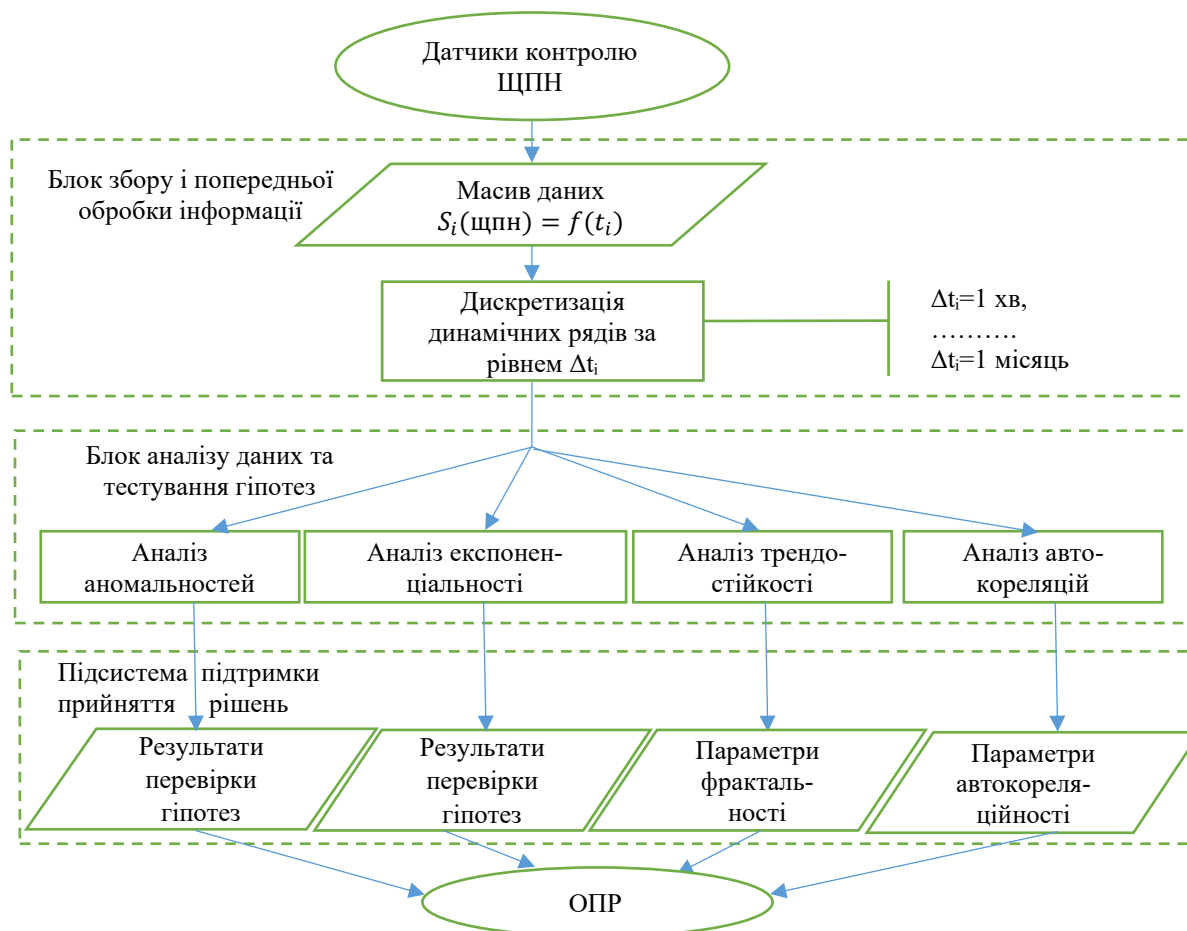


Рис. 1 - Блок-схема підсистеми аналізу динамічних рядів ЩПН

Блок-схема підсистеми аналізу динамічних рядів ЩПН представлена на рис.1.

Принцип роботи запропонованої підсистеми аналізу динамічних рядів щільності потоку нейтронів включає в себе наступні етапи:

1) датчики контролю фіксують значення ЩПН, формують динамічні ряди даних з періодичністю  $t = 1$  хв в режимі 24/7. На основі цих показників формуються масиви  $S_i(\text{щпн}) = f(t_i)$  об'ємом десятки тисяч одиниць.

2) З метою оперативної діагностики стану ЩПН та запитів особи, що приймає рішення (ОПР) щодо параметрів контролю станів проводиться дискретизація динамічних рядів за визначеними часовими інтервалами  $\Delta t_i = 1$  хв, ..., 1 місяць

3) Блок аналізу даних проводить операції тестування дискретизованих динамічних рядів даних на наявність в них аномальних значень, моментів/часових інтервалів переходу динаміки ЩПН до експоненціального закону розподілу, визначення фрактальних властивостей динамічних рядів – наявності чи відсутності тренду (персистентності/антиперсистентності), автокореляційних властивостей рівнів ряду та характеристик автокореляції (її направленості, порядку, величини лагу тощо).

4) Отримані у блоці аналізу результати у вигляді критеріальних наборів, результатів тестування та параметрів є основою для формулювання у блоці підтримки прийняття рішень варіантів дій для ОПР, які їй і передаються.

Автоматизація процесу оцінки динамічних рядів ЩПН за умови пропонованих математичних моделей, обчислювальних методів та критеріального апарату визначення параметрів дасть змогу проводити надійне автоматичне розпізнавання аномальних і передкритичних станів контрольованих паливовмісних мас в НБК-ОУ. Процес підтримки прийняття рішень буде алгоритмізованим і обґрунтованим на рівні адекватних статистичних критеріїв та оцінки параметрів із заданим рівнем значущості.

Пропонований алгоритм роботи може бути базою для створення відповідного програмного забезпечення для систем діагностики ядерної безпеки, систем підтримки прийняття рішень, систем прогнозування станів об'єктів ядерної енергетики.

### Література

1. Шараєвський, І. Г., Власенко, Т. С., Зімін, Л. Б., Носовський, А. В., Фіалко, Н. М., & Шараєвський, Г. І. (2021). Перспективні напрями підвищення експлуатаційної надійності та забезпечення оперативного управління ресурсом головного обладнання. *Ядерна енергетика та довкілля*, 3(22), 3–13.

2. О. Кафтанатіна, Є. Меньшенін, П. Л. Кордюков Дослідження радіаційно-небезпечних об'єктів, що характеризуються неконтрольованими радіаційними впливами на довкілля / // Чорнобильський науковий хаб. Науково-практичний журнал. — 2021. — Вип. 1—2 (2—3). — С. 25—29.

3. Скітер, І. С., & Савельєв, М. В. (2021). Моделювання аномалій щільності потоку нейтронів в автоматизованій системі контролю ядерної безпеки об'єкта «Укриття». *Математичні машини і системи*, 4, 70–77.

4. Р. Л. Годун, М. В. Савельєв, Є. Д. Висотський, К. О. Сущенко, І. С. Скітер Аналіз нейтронної активності на периферії локалізованих в НБК-ОУ накопичень паливовмісних матеріалів / // Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2020 : тези доповідей П'ятнадцятої Міжнародної науково-практичної конференції). – Чернігів : ЧНТУ, 2020. –С. 103–107.

## МОДЕЛЬ ВІТРОВОГО ОБТІКАННЯ ТА РОЗПОДІЛУ ТИСКІВ НА ПОВЕРХНЯХ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТА ЧАЕС

*Склярєнко Дмитро, Круковський Павло, Дядюшко Євгеній*

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а,  
Ел. адреса: [kruk\\_2@ukr.net](mailto:kruk_2@ukr.net)

**Annotation:** For the task of control of fugitive air exchange and radioactive aerosols (RA) from the NSC main volume (MV) into the surrounding space the information on wind pressure distribution on the NSC outer surface and on the Shelter building structures is needed.

For this purpose, during the design phase the physical model of NSC on a scale of 1:300 was tested in a wind tunnel and wind pressure distribution maps on the outer surface of the NSC model for all directions of air blowing from  $0^0$  to  $360^0$  in steps of 10 degrees were produced. The pressure maps represent pressure values at 197 separate locations on the west, east and cylindrical surfaces of the NSC fine-scale physical model of the NSC, which did not contain all structures under the walls and near the NSC. In operation, these wind pressure distributions were used to perform the above task, the results of which showed that these pressure maps are qualitatively and quantitatively inconsistent with the literature experimental and computational data.

The paper considers a three-dimensional full-scale 1:1 computer model of the external air flow around the NSC for the same rotation angles and arbitrary velocity range, which was pre-tuned according to the literature and experimental data of the ChNPP which contains all structures under the walls and near the NSC. In contrast to the physical model, the computer full-scale model allows to obtain continuous pressure distributions over the whole NSC surface of 87,6 thousand  $m^2$  in contrast to 197 values in separate sections of the physical small-scale model of the NSC.

Для задачі аналізу та контролю виходу неорганізованого повітрообміну та радіоактивних аерозолів (РА) із основного об'єму (ОО) НБК в оточуюче середовище (ОС) необхідна інформація про розподіл вітрових тисків на зовнішній поверхні НБК та на будівельних конструкціях об'єкта "Укриття".

Для цього дрібномасштабна фізична модель НБК у масштабі 1:300 (рис.1,а) при проектуванні НБК була випробувана в аеродинамічній трубі та були отримані карти розподілу вітрових тисків на зовнішній поверхні моделі НБК для всіх напрямків обдуву повітрям від  $0^0$  до  $360^0$  з кроком 10 градусів [1].

Карти тисків є значеннями тисків у 197 окремих ділянках західної, східної та циліндричної поверхонь НБК дрібномасштабної фізичної моделі НБК (рис.1,а), яка не містила в собі всіх конструкцій під стінами та біля НБК. При експлуатації ці розподіли вітрових тисків були використані для виконання наведеного вище завдання, результати якого показали, що ці карти тиску якісно і кількісно не відповідають літературним експериментальним і розрахунковим даним. Альтернативним шляхом отримання карт тиску є шлях побудови комп'ютерної моделі за допомогою за допомогою CFD (Computational fluid dynamics) технології (рис.1,б).

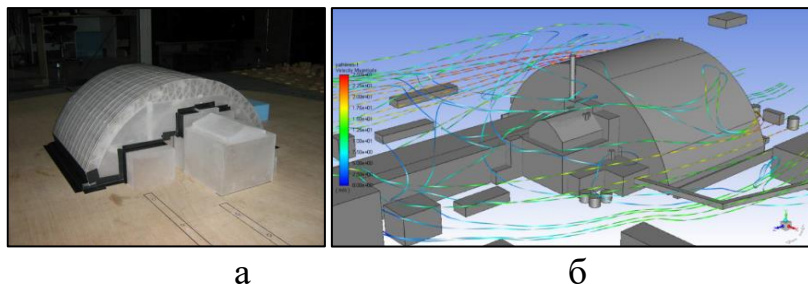


Рис.1 - НБК та Об'єкт «Укриття». а – фото мікомасштабної фізичної моделі в каналі аеродинамічної труби з південно-східного кута погляду та б – повномасштабне моделювання зовнішнього аеродинамічного обтікання НБК і прилеглих будівель з північно-східного кута погляду

**Метою роботи** є побудова тривимірної повномасштабної 1:1 комп'ютерної CFD (Computational fluid dynamics) моделі зовнішнього обтікання повітряним потоком НБК (рис.1,б) для довільних кутів повороту та швидкостей вітру та попереднє налаштування моделі відповідно до літературних та експериментальних даних ЧАЕС, що містить у собі всі конструкції під стінами та біля НБК для отримання розподілу тисків по зовнішній поверхні НБК та будівельним конструкціям об'єкта «Укриття» при обтіканні повітрям.

У роботі розглядається тривимірна повномасштабна 1:1 комп'ютерна модель зовнішнього обтікання повітряним потоком НБК (рис.1,б) для таких самих кутів повороту та довільного діапазону швидкостей, яка була попередньо налаштована відповідно до літературних та експериментальних даних ЧАЕС, що містить у собі всі конструкції під стінами та біля НБК. Геометрична модель має розміри 3,5x3,5 км, до верхньої границі 800 м. Напрямок вітру враховувався за допомогою повороту внутрішнього об'єму повітря радіусом 1,0 км разом з НБК (рис.2). Розрахункова сітка тривимірної моделі НБК складається з 3,5 млн. комірок багатогранної форми.

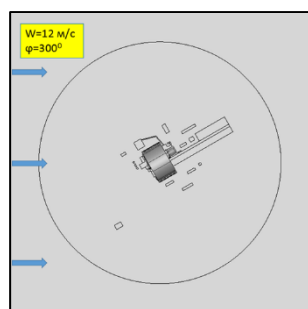


Рис.2 – Область комп'ютерної моделі НБК і оточуючого середовища яка повертається відносно напрямку вітру (вказано напрямком 300<sup>0</sup>)

На відміну від фізичної моделі, комп'ютерна повномасштабна модель дозволяє отримувати безперервні розподілу тисків на всій поверхні НБК (рис.3), що становить 87,6 тис. м<sup>2</sup>, на відміну від 197 значень в окремих ділянках фізичної дрібномасштабної моделі НБК.

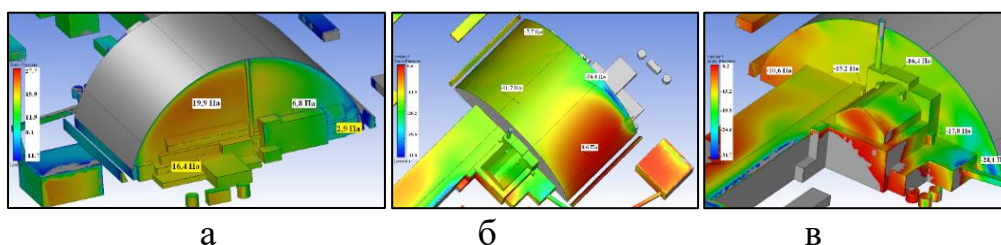


Рис.3 - Розподіл статичного тиску по поверхнях НБК та будівельним конструкціям об'єкта «Укриття»

Отримано карти розподілу тисків по зовнішній поверхні НБК та будівельних конструкцій об'єкту «Укриття» для різних напрямків вітру, які якісно та кількісно співпадають з літературними даними [2-4] зовнішнього обтікання будівель та теплиць.

В результаті отримані карти розподілу вітрових тисків по зовнішній поверхні НБК та будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» можливо використовувати для прогнозу значення витрати  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) протікання повітря з РА назовні та всередину НБК та керувати вентиляційною системою НБК з метою неперевищення гранично допустимого рівня викиду РА із НБК [5].

**Висновок.** У роботі представлена тривимірна повномасштабна 1:1 комп'ютерна модель зовнішнього обтікання повітряним потоком НБК для різних кутів повороту та довільного діапазону швидкостей, результати якої з достатньою точністю узгоджуються з літературними та експериментальними даними ЧАЕС, що містить у собі всі конструкції під стінами та біля НБК. Модель необхідна для отримання розподілу вітрових тисків на зовнішній поверхні НБК та на будівельних конструкціях об'єкта "Укриття" та вирішення завдання контролю виходу неорганізованого повітрообміну та РА з ОО НБК в оточуюче середовище.

### **Перелік посилань.**

1. Результаты испытаний в аэродинамической трубе: (Отчет) / СП НОВАРКА. – SIP-N-TE-22-B102-RPT-001-01.

2. Вальгер С. А., Федоров А. В., Федорова Н. Н. Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent // Вычислительные технологии. – 2013. – Том 18. – №5. – с.27-40.

3. CEN. Eurocode EN 1991-1-4: Actions on Structures—Part 1-4: General Actions—Wind Actions; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2010.

4. Chrysanthos Maraveas. Wind Pressure Coefficients on Greenhouse Structures // Agriculture. – 2020. – №. 10,149. – P. 1 - 21.

5. Круковський П. Г., Склярєнко Д. І., Дядюшко Є. В., Кондратенко С. О., Кузьменко В. Г. Аналіз і керування низьким викидом повітря із нового безпечного конфайнмента в оточуюче середовище. Збірник матеріалів VI Міжнародної конференції в режимі онлайн «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища», INUDECO 2021, 27–29 квітня 2021 р., м. Славутич, Україна, с. 137-140.

## **ПОСТІЙНО ДІЮЧА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ТА МІГРАЦІЙНИХ УМОВ МІЖРІЧЧЯ РР. ПРИП'ЯТЬ – УЖ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ**

*Сосонна Н., Панасюк М., Коваленко І.*

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль,  
07270, Україна e-mail:isnpnp@isnpnp.kiev.ua

**Ключові слова:** Чорнобильська зона відчуження, підземні води, 3-х мірна математична модель, чисельне моделювання, фільтраційні та міграційні прогнози, радіоактивне забруднення.

На території Чорнобильської зони відчуження проектується, будуються та експлуатуються багато радіаційно-небезпечних об'єктів. **На превеликий жаль, виклики сьогодення включають і терористичну діяльність Росії в Україні, зокрема, в Чорнобильській зоні відчуження.** Для вивчення впливу цих об'єктів на довкілля, прогнозування змін радіогідроекологічних умов під впливом техногенних факторів та кліматичних змін постала необхідність в створенні постійно діючої моделі фільтраційних та міграційних умов міжріччя Прип'ять – Уж Чорнобильської зони відчуження. Сучасні інформаційні технології моделювання гідрогеологічних об'єктів дозволяють повністю автоматизувати весь процес моделювання, а саме, від створення моделі до представлення результатів прогнозу поведінки природних та техногенних процесів. В даний час існує велика кількість систем моделювання, що дозволяють будувати двох-, або тривимірні моделі геофільтраційних процесів: Visual Modflow, PMWIN, FREEWAT, Feflow, AquaveoGMS та інші. [1]. Область застосування геофільтраційних розрахунків надзвичайно широка, це: прогнози змін радіогідроекологічних умов в підземних водах під впливом терористичних дій, захист підземних вод від забруднення, оцінка запасів підземних вод, їх балансова характеристика, захист територій від підтоплення, визначення витрат, швидкості руху підземних вод та міграції радіонуклідів з ними, прогнози впливу радіаційно-небезпечних об'єктів на довкілля.

В теперішній час переважно використовується чисельне моделювання геофільтрації. Воно передбачає сіткову розбивку території фільтрації і базується на кінцево-різницевому методі рішення диференціальних рівнянь, коли приватні похідні замінюються кінцевими приростами і саме диференціальне рівняння зводиться до системи алгебраїчних рівнянь.

Дані рівняння включають такі основні гідродинамічні параметри, як напори і коефіцієнти фільтрації. Кількість рівнянь дорівнює числу блоків сіткової розбивки. Таким чином, чисельне моделювання полягає у вирішенні рівнянь фільтрації, при цьому повинні бути визначені граничні умови і структура фільтраційного поля [2].

Для спільного опису безнапірної та напірної фільтрації застосовується загальновідоме диференціальне рівняння в приватних похідних [3]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

де:

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  та  $K_{zz}$  – значення коефіцієнта фільтрації вздовж осей координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (L/t);

$h$  – напір (L);

$W$  – об'ємний потік на одиницю об'єму, що представляє джерела та/або стоки води, з  $W < 0,0$  для витікання з системи ґрунтових вод та  $W > 0,0$  для потоку в систему (1/t);

$S_s$  – питома ємність пористого середовища (1/t);

$t$  – час (t).



Рівняння (1) описує фільтрацію в несталому режимі в гетерогенному та анізотропному середовищі. Для конкретних природніх умов робляться припущення та спрощення, які не протирічать наведеному рівнянню.

Алгоритм відстеження частинок, в модулі MODPATH, може бути реалізований як для стаціонарних, так і для перехідних полів потоку. За простотою, алгоритм спочатку описується для стаціонарного потоку, а потім поширюється на системи перехідних потоків. Рівняння у часткових показниках, що описує збереження маси у стаціонарній тривимірній системі потоків ґрунтових вод, можна виразити як

$$\frac{\partial}{\partial x}(nv_x) + \frac{\partial}{\partial y}(nv_y) + \frac{\partial}{\partial z}(nv_z) = W \quad (2)$$

де  $v_x$ ,  $v_y$  і  $v_z$  - основні компоненти середнього лінійного вектору швидкості ґрунтових вод;

$n$  – пористість;

$W$  – об'єм води, що створюється або споживається внутрішніми джерелами та стоками на одиницю об'єму водоносного горизонту [4]. Кінцево-різницеве наближення рівняння (2) можна розглядати як рівняння балансу маси для осередку сітки скінченного розміру з об'ємним водоносним горизонтом, що враховує воду, яка надходить у осередок та виходить з нього, а також для води, що виробляється або споживається всередині осередку сітки.

Область моделі була вибрана на міжріччі річок Прип'ять та Уж (рис.1).

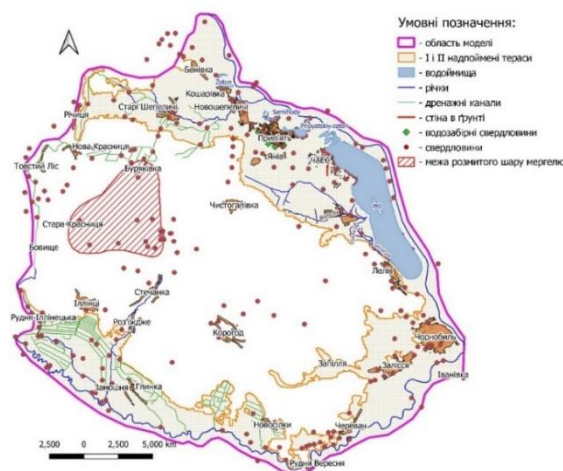


Рис. 1. Природні та техногенні умови району

Ці річки та водоймище-охолоджувач, оз. Азбучин, Семиходи, Прип'ятський затон визначені в моделі як граничні умови першого роду. Природне навантаження на територію, крім Прип'яті та Ужа мають такі річки, як Сахан, Ілля, Мар'янівка, Глиниця. Перетворені в дренажні канали в заплаві р. Уж та Сахан, як об'єкти техногенного навантаження, відносяться до граничних умов третього роду. Малі річки, канали задаються в фільтраційній моделі з урахуванням рівня води, реальних розмірів та водопровідності їх донних відкладів.

До об'єктів техногенного навантаження також відносяться об'єкти Чорнобильської атомної станції, які були, є і побудовані після аварії, об'єкти водогосподарської діяльності – свердловини Прип'ятського водозабору, дренажі підземних вод, ставок-охолоджувач з дренажними каналами, поля фільтрації побутових стоків ЧАЕС (КОС м. Прип'ять). До нових техногенних умов, які з'явилися після аварії на ЧАЕС 1986 року відноситься радіонуклідне забруднення поверхні землі, пункти тимчасової локалізації радіоактивних відходів, пункт довгострокового захоронення радіоактивних відходів (ПЗРО) «Підлісний», «стіна в ґрунті» [5].

Межі, які відокремлюють флювіагляціальні від алювіальні відклади були отримані з растрової карти цифрової моделі рельєфу (DEM) із супутникового знімку Японського Агентства Аерокосмічних Досліджень (JAXA) з розподільною здатністю 40 м.

Абсолютні відмітки рельєфу в заплавах річок Прип'ять, Уж, Сахан, та на першій надзаплавній терасі і в заплаві коливаються в межах від 100 до 116 м, абсолютні відмітки рельєфу флювіагляціальної рівнини досягають значень 162 м. За даними досліджень [6] коефіцієнт фільтрації алювіальних відкладів приймаємо 30 м/доб, флювіогляціальних – 12 м/доб.

Фільтраційна модель складається з трьох геологічних шарів (рис.2).

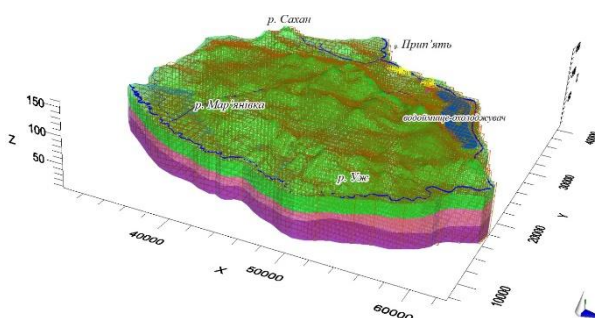


Рис.2 Схема трьовимірної моделі фільтрації.

Вона має два водоносних шара – верхній безнапірний та нижній напірний бучацький горизонт з коефіцієнтом фільтрації 8 м/доб, розділених між собою слабопроникним (0,0003 м/доб) шаром Київського мергелю. Але, в районі населених пунктів Стара Красниця та Буряковка шар мергельних глин розмитий і на цій території два водоносних горизонти сполучаються між собою. В літологічному плані перший водоносний горизонт складається, в основному, з пісків. Супіски та суглинки зустрічаються у вигляді лінз невеликої площі та потужності, які не перешкоджають руху ґрунтових вод на регіональній основі. Відповідно, перший водоносний горизонт веде себе як єдиний резервуар підземних вод. Напори ґрунтових вод та другого водоносного горизонту прийняті станом на початок жовтня 2017 р. за результатами спостережень ІПБ АЕС НАНУ та ДСП «ЕКОЦЕНТР».

Стіна в ґрунті, що виконана з глини і врахована в моделі шляхом змінення коефіцієнту фільтрації в осередках розрахункової сітки, через які вона проходить.

Розрахунок інфільтраційного живлення безнапірного водоносного горизонту проводився за результатами спостережень за режимом ґрунтових вод

в районі ЧАЕС. Дані інфільтраційного живлення на полях – фільтрації (КОС м. Прип'ять) отримані за допомогою моделювання, згідно даних про подачу каналізаційної води. Відповідність фільтраційної моделі фактичним умовам (калібровка моделі) була досягнена шляхом порівняння результатів моделювання та реальними спостереженнями гідрогеологічних умов по існуючим свердловинам. У випадках значної розбіжності результатів проводилось коректування в деяких вузлах моделі коефіцієнтів фільтрації, водопровідності донних відкладів малих річок, величини інфільтраційного живлення, тощо. В результаті, коефіцієнт кореляції між даними, отриманими по спостережним свердловинам та розрахованих за допомогою моделі має значення 0,85.

**Висновки.** Постійно діюча модель фільтраційних та міграційних умов міжріччя Прип'ять – Уж Чорнобильської зони відчуження дозволяє отримати прогнози змін радіогідроекологічної обстановки в підземних водах під впливом будівництва, експлуатації та зняття з експлуатації радіаційно – небезпечних об'єктів.

Модель дозволяє виконувати розрахунки змін гідрогеологічних умов під впливом глобального потепління клімату.

Модель може бути використана для оперативних прогнозів розповсюдження радіонуклідів під впливом терористичної діяльності, зокрема під впливом влаштування терористами окопів у Рудому лісі.

Результати виконання прогнозів дозволяють оптимізувати проектні та управлінські рішення по спорудженню об'єктів та захисту підземних вод від забруднення.

### **Список літератури/ Reference**

1. Groundwater modelling system. Version 3.1. Tutorial manual. Environmental Modeling Research Laboratory of Brigham Young University. The USA, 2000.]

2. Коносавский П. К., Соловейчик К. А. Математическое моделирование геофильтрационных процессов. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001 – 96 с] <https://ua1lib.org/book/3042087/a18629>

3. The Official U.S.G.S MODFLOW (A Modular Tree Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model). Reference Manual. Waterloo Hydrogeologic, 2012) <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/PDF/TM6-A16ch2.pdf>

4. Pollock, D.W., User guide for MODPATH version 6—A particle-tracking model for MODFLOW: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 2012, book 6, chap. A41, 58 p. <https://pubs.usgs.gov/tm/6a41/>

5. Звіт з НДР: «Комплексна оцінка сукупних впливів на навколишнє середовище радіаційно небезпечних об'єктів чорнобильської зони відчуження»/ Інститут проблем безпеки атомних електростанцій (ІПБ АЕС)// 2020, 888с.

6. Н. И. Панасюк. Определение коэффициента фильтрации аллювиальных песков в районе промплощадки ЧАЭС// Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля, 2014. - Вип. 23. - С. 124 – 130.

# **PERMANENT MATHEMATICAL FILTRATION MODEL AND MIGRATION CONDITIONS OF THE INTERMEDIATE RIVERS PRIPYAT - UZH OF THE CHERNOBYL EXCLUSION ZONE**

*Sosonna N., Panasiuk M., Kovalenko I.*

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine [nipanasjuk53@gmail.com](mailto:nipanasjuk53@gmail.com)*

*Many radiation-hazardous facilities are designed, built and operated in the Chornobyl Exclusion Zone. Unfortunately, today's challenges include Russia's terrorist activities in Ukraine, particularly in the Chernobyl Exclusion Zone. To study the impact of these facilities on the environment, forecasting changes in radiohydro-ecological conditions under the influence of man-made factors and climate change, it became necessary to create a permanent model of filtration and migration conditions between the Pripyat-Chornobyl Exclusion Zone. Modern information technologies for modeling hydrogeological objects allow to fully automate the entire modeling process, namely, from the creation of the model to the presentation of the results of the forecast of the behavior of natural and man-made processes. Currently, there are a large number of modeling systems that allow you to build two- or three-dimensional models of geofiltration processes: Visual Modflow, PMWIN, FREEWAT, Feflow, AquaveoGMS and others. The scope of geofiltration calculations is extremely wide, they are: forecasts of changes in radiohydroecological conditions in groundwater under the influence of terrorist acts, protection of groundwater from pollution, assessment of groundwater reserves, their balance characteristics, protection of areas from flooding, costing, groundwater flow and migration radionuclides with them, forecasts of the impact of radiation-hazardous objects on the environment.*

*At present, numerical simulation of geofiltration is mainly used. It provides a grid breakdown of the filtration area and is based on the finite-difference method of solving differential equations, when partial derivatives are replaced by finite increments and the differential equation itself is reduced to a system of algebraic equations.*

*The constant model of filtration and migration conditions of the interfluvium of the Pripyat-Uzhno-Chornobyl Exclusion Zone allows to obtain forecasts of changes in the radio-hydroecological situation in groundwater under the influence of construction, operation and decommissioning of radiation-hazardous facilities.*

*The model allows calculations of changes in hydrogeological conditions under the influence of global warming.*

*The model can be used for operational forecasts of the spread of radionuclides under the influence of terrorist activities, in particular under the influence of the construction of trenches by terrorists in the Red Forest.*

*The results of the forecasts allow to optimize the design and management decisions for the construction of facilities and protection of groundwater from pollution.*

# ОЦІНКА РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ВНАСЛІДОК ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ В ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ В ПЕРІОД З 11 ПО 31 БЕРЕЗНЯ 2022 РОКУ

*Талерко Микола, Лев Тетяна, Носовський Анатолій*

Інститут проблем безпеки АЕС НАНУ, м. Київ, [ntalerko@gmail.com](mailto:ntalerko@gmail.com)

**Abstract** As a result of the armed invasion of the Russian troops on the territory of Ukraine, intense wildland fires took place in the Chernobyl exclusion zone and adjacent radioactively contaminated territories of Kyiv and Zhytomyr regions in March 2022, which resulted in increased levels of radioactive air pollution. Calculations of the  $^{137}\text{Cs}$  dispersion in the air emitted into the atmosphere due to the natural fires were performed with using of the model of resuspension, atmospheric transport, and deposition of radionuclides LEDI in the territory of Ukraine. According to the simulation results, the levels of concentration of radionuclide activity in the air and the associated doses of additional human exposure were several orders of magnitude lower than the established standards. The total  $^{137}\text{Cs}$  emissions during wildland fires in the period March 11–31, 2022 is estimated as 226 GBq. The average daily concentration of  $^{137}\text{Cs}$  activity in the surface air of Kyiv could reach values of about  $10 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  on March 20, up to  $100 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  on March 21, and up to  $25 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  on March 22-23, 2022. These values are 4-5 orders of magnitude less than the permissible concentration of  $^{137}\text{Cs}$  in the air for category B  $800 \text{mBq}/\text{m}^3$ .

**Keywords:** wildland fire, radionuclide, atmospheric transport, modeling, Chernobyl exclusion zone.

**Вступ.** Внаслідок збройного вторгнення військ РФ на територію України в період захоплення території Зони відчуження (ЗВ) в лютому-березні 2022 р. суттєво зросли ризики погіршення радіаційного стану в самій Зоні та за її межами. Одним з факторів, що в цей час міг призвести до підвищення рівня радіоактивного забруднення повітря, є виникнення лісових пожеж на радіоактивно забруднених територіях.

**Загальний опис ситуації.** Для аналізу динаміки виникнення природніх пожеж в радіоактивно забруднених лісових масивах ЗВ та прилеглих до них територіях Київської та Житомирської областей було використано дані сайту The Fire Information for Resource Management System (FIRMS) [1]. Для кожної доби за період з 11 по 31 березня 2022 р. розташування районів пожеж визначалось згідно даними продуктів MOD14 (Terra) / MYD14 (Aqua) для MODIS Collection 6, VIIRS (S-NPP) I Band 375 m, та VIIRS (NOAA-20/JPSS-1) I Band 375 m, отриманими за даними супутникових радіометрів MODIS (на супутниках Terra та Aqua) і VIIRS, встановлених на супутниках S-NPP та NOAA-20 Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США) (Рис. 1).

Згідно з даними [1], інтенсивні природні пожежі в радіоактивно забруднених лісах розпочалися з 11 березня 2022 р. переважно в західній та центральній частинах ЗВ. Основні райони пожеж спостерігались близько населених пунктів Поліське, Стечанка, Бобер та Пухове (Рис.2). Протягом 12 – 15 березня великих пожеж в межах ЗВ не зафіксовано. 16 березня лісові пожежі відновилися в районі

Поліського- Котовського, а також виникли біля села Королівка. 17 березня пожежа в районі Поліського розповсюдилася в північно-східному напрямку до села Рудня-Грезлянська. В цьому ж районі пожежа тривала наступної доби 18 березня. Крім цього, виникли нові осередки в районі села Тараси та на радіоактивно забрудненій території за межами ЗВ поблизу с. Христинівка.

Протягом 19 березня 2022 р. тривали пожежі в межах ЗВ (в районі сіл Рудня-Грезлянська і Тараси/Володимирівка/Жовтневе), а також на радіоактивно забрудненій території за межами ЗВ поблизу с. Христинівка Житомирської області. Утворився новий інтенсивний осередок пожежі в 10-кілометровій зоні ЧАЕС в районі сіл Товстий Ліс та Буда на території з високими ріннями забруднення навколишнього середовища цезієм-137 та стронцієм-90 (Рис. 2). Подальше розповсюдження вогню в цих же осередках (окрім району с. Рудня-Грезлянська) зафіксовано протягом наступних двох днів 20-21 березня. Крім того, спостерігались менш інтенсивні осередки горіння в південно-західній частині ЗВ та в Житомирській області поряд з границями зони.

Протягом 22 березня 2022 р. не зафіксовано значних осередків природних пожеж в зоні відчуження. Разом з тим посилися пожежі на захід від ЗВ на території Народицького району Житомирської області (Рис. 2). Наступної доби 23 березня знову інтенсифікувалися пожежі в тих частинах зони відчуження, де вони спостерігались раніше – насамперед на західному сліді чорнобильських аварійних випадків з високими ріннями забруднення навколишнього середовища цезієм-137 та стронцієм-90 в районі сіл Товстий Ліс / Буда, а також в районах населених пунктів Поліське, Буда-Варовичі та Тараси. Особливо великих розмірів (діаметром до 4-х км) досяг осередок горіння біля сел Бобер/Королівка. 24 березня ситуація значно покращилася на територіях пожеж попередніх днів – великих осередків пожеж практично не зафіксовано. Натомість з'явилися два нових – на березі р. Прип'ять біля міста Чорнобиль та в південній частині зони – біля села Черевач.

Внаслідок зміни погодних умов ввечері 24 та вночі 25 березня на території Київської області пройшли інтенсивні зливи, в результаті чого 25 березня природні пожежі в зоні відчуження припинилися. Протягом доби спостерігався лише невеликий осередок пожеж на південь від ЗВ (поблизу села Городещина). Протягом 26 березня 2022 р. в ЗВ зафіксовано лише один невеликий осередок природних пожеж в районі нп Поліське (рис. 1). 27 березня поновилися пожежі біля с. Тараси. Припинення злив у другій половині доби 27 березня призвело до посилення пожежі в цьому районі протягом 28 березня, а також поновлення природних пожеж біля південно-західної границі ЗВ в Народицькому районі Житомирської області. Крім того, 28.03 зафіксовано виникнення нового осередку вогню в районі «Рудого лісу» на відстані 2,5 – 4 км на захід від Чорнобильської АЕС. Наступної доби 29 березня в цьому районі горіння припинилось, натомість продовжувались пожежі в районі Тарасів та в Народицькому районі (рис. 1). Поновлення зливових опадів ввечері 29 березня призвело до практично повного припинення природних пожеж в ЗВ та в прилеглих до неї районах протягом 30-31 березня 2022 р.

Пожежі в ЗВ в основному охопили території, які до Чорнобильської аварії використовувались для сільськогосподарського виробництва, а зараз переважно

вкриті травянистою рослинністю. Цей же висновок – відносно невелика площа пожеж в лісових масивах - ілюструє і карта рослинного покриву, зроблена в пост-чорнобильський період (Рис.3).

Відзначимо, що пожежі 2020 р. частково мали місце на тих же територіях, де вони трапилися в квітні 2020 р. (Рис. 4) – в основному в південно-західній частині ЗВ та в районі сіл Товстий Ліс / Буда.

На рис. 5 наведено результати оцінок добових значень емісії активності  $^{137}\text{Cs}$  внаслідок пожеж в ЗВ за період з 11 по 31 березня 2022 р. Оцінка сумарної (за цей період) емісії активності  $^{137}\text{Cs}$  склала 226 ГБк.

### **Результати моделювання атмосферного перенесення радіонуклідів**

Було виконано моделювання розповсюдження  $^{137}\text{Cs}$ , піднятого в повітря в результаті лісових пожеж в Зоні відчуження протягом 11-31 березня 2022 р. Для розрахунків було використано модельний комплекс підйому, атмосферного перенесення та осадження радіонуклідів на підстильну поверхню LEDI, розроблений в ІПБ АЕС НАН України [2].

В якості вхідної метеорологічної інформації для проведення модельних розрахунків були використані результати моделі чисельного прогнозу погоди WRF, яка забезпечує метеорологічними даними роботу СППР RODOS в Україні [3]. Було використано результати прогнозу погоди на період з 00 год. 11 березня по 00 год. 20 березня 2022 р. з кроком у часі 1 год. на чисельній сітці  $153 \times 66$  вузлів у горизонтальній площині (розміри сітки 49.15 – 52.40 град. пн. ш., 24.25 – 31.85 сх. д., крок сітки – 0.05 град). По вертикалі використовувалось нижні 13 рівнів розрахункової сітки – до рівня 700 гПа.

На рис. 6 наведено результати модельних розрахунків полів середньодобової концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  в приземному шарі повітря, обумовлені підйомом продуктів горіння протягом окремих діб за період з 11 по 31 березня 2022 р.

Протягом першої половини доби 11 березня зберігався південно-західний напрямок перенесення активності з ЗВ (Рис. 6а). В кінці доби він змінився на південно-східний, в результаті чого радіоактивні продукти горіння могли досягати центральних та південних областей України, і дали виносились у напрямку Молдови, Румунії та акваторії Чорного моря. Розрахункові значення середньодобової активності  $^{137}\text{Cs}$  могли досягати 1 мБк/м<sup>3</sup> на відстані до 150-200 км від ЗВ. Зазначимо, що значення допустимої концентрації  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі для категорії В складає 800 мБк/м<sup>3</sup>. Водночас, згідно розрахункам, в самій зоні відчуження значення середньодобової активності  $^{137}\text{Cs}$  в приземному повітрі могли досягати 150 мБк/м<sup>3</sup>. Протягом 16 березня напрямок перенесення продуктів горіння змінився за західний (Рис. 6б). Внаслідок цього в основному радіоактивне забруднення повітря мало місце в північно-західній частині України і на території Білорусі, з подальшим виносом в напрямку Балтійського моря. Наступні дві доби 17-18 березня перенесення радіоактивних аерозолів з ЗВ тривало в західному напрямку (Рис. 16в-г). Протягом періоду з 11 по 18 березня перенесення радіоактивних аерозолів – продуктів горіння в ЗВ на Київ не відбувалось.

Згідно результатам моделювання, перенесення продуктів горіння внаслідок пожеж в ЗВ протягом 19 березня та першої половини 20 березня відбувалось в південно-західному напрямку (Рис. 6д-е). Ввечері 20 березня напрямок

перенесення продуктів горіння з Зони відчуження змінився на південний, що могло призвести до підвищення вмісту радіоактивних аерозолів в повітрі центральних районів України. Зокрема, модельні оцінки показують, що середньодобова концентрація активності  $^{137}\text{Cs}$  в приземному повітрі Києва в цей період могла досягати значень близько  $10 \text{ мкБк/м}^3$ . При цьому потрібно зауважити, що: 1) це значення на 5 порядків менше величини допустимої концентрації  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі для категорії В  $800 \text{ мкБк/м}^3$ ; 2) воно значно менше значень концентрації  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі Києва в період пожеж 2020 р. (наприклад, за даними вимірювань середня концентрація  $^{137}\text{Cs}$  протягом 9-11 квітня 2020 р. дорівнювала  $477 \text{ мкБк/м}^3$ ).

Вночі 21 березня 2022 р. зберігався південний напрямок перенесення продуктів горіння, внаслідок чого модельна оцінка середньодобової концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  в приземному повітрі Києва склала близько  $100 \text{ мкБк/м}^3$ . Проте з ранку 21 березня напрямок перенесення знову змінився на південно-західний, що призвело до поновлення забруднення повітря радіоактивними аерозолями в центральних та південних областях України та їх подальшим перенесенням на території Молдови та Румунії (Рис. 6є).

Перенесення продуктів горіння внаслідок пожеж в ЗВ протягом першої половини доби 22 березня зберігалось в південно-західному напрямку (рис. 6ж). В другій половині доби 22 березня напрямок перенесення продуктів горіння з Зони відчуження змінився на південно-східний, що могло призвести до підвищення вмісту радіоактивних аерозолів в повітрі центральних районів України. Згідно результатів моделювання, середньодобова концентрація активності  $^{137}\text{Cs}$  в приземному повітрі Києва в цей період могла досягати значень близько  $25 \text{ мкБк/м}^3$ . До вечора 23 березня південно-східний напрямок перенесення радіоактивних аерозолів з Зони відчуження зберігався, після чого змінився на східний, що призвело до формування поля радіоактивного забруднення повітря, що охопило практично всю східну частину України (Рис. 6з). До кінця доби 23 березня 2022 р. південно-східний напрямок перенесення продуктів горіння відновився і зберігався протягом усієї доби 24 березня 2022 р. (Рис. 6и). Протягом 25 березня додаткове радіоактивне забруднення приземного повітря на території України внаслідок природних пожеж в Зоні відчуження було практично відсутнє.

Згідно результатам моделювання, перенесення продуктів горіння внаслідок пожеж в ЗВ протягом 27 березня зберігалось в південно-східному напрямку (рис. 6і), а 28-29 березня – в східному. Середньодобова концентрація активності  $^{137}\text{Cs}$  в приземному повітрі за межами ЗВ 28 березня могла досягати значень до  $200\text{-}500 \text{ мкБк/м}^3$ , а 27 та 29 березня – не перевищувала  $10 \text{ мкБк/м}^3$  (Рис. 6і-к). Протягом 30-31 березня додаткове радіоактивне забруднення приземного повітря на території України внаслідок природних пожеж в Зоні відчуження було практично відсутнє.

**Висновки.** Природні пожежі в радіоактивно забруднених лісах у Зоні відчуження та поблизу її кордонів протягом 11-31 березня 2022 року призвели до додаткового радіоактивного забруднення навколишнього середовища в самій Зоні, а також до атмосферного переносу радіоактивних аерозолів за її межі. Проте, згідно з результатами моделювання, рівні концентрації активності



радіонуклідів в повітрі та пов'язані з цим дози додаткового опромінення людини були на кілька порядків нижчими за встановлені нормативи.

За модельними оцінками, середньодобова концентрація активності  $^{137}\text{Cs}$  у приземному повітрі Києва 20 березня могла досягти значень близько  $10 \text{ мкБк/м}^3$ , 21 березня – до  $100 \text{ мкБк/м}^3$ , а 22-23 березня – до  $25 \text{ мкБк/м}^3$ . Ці значення на 4-5 порядків менші за допустиму концентрацію  $^{137}\text{Cs}$  у повітрі для категорії В, що дорівнює  $800 \text{ мкБк/м}^3$ . Крім того, вони значно нижчі від значень концентрації  $^{137}\text{Cs}$  у повітрі Києва під час пожеж 2020 р. (наприклад, за даними вимірювань, середня концентрація  $^{137}\text{Cs}$  протягом 9-11 квітня 2020 р. становила  $477 \text{ мкБк/м}^3$ ).

Оцінка радіоактивного забруднення повітря в самій Зоні відчуження утруднена через те, що під час пожеж була пошкоджена і не працювала автоматизована система радіаційного контролю.

Лісові пожежі в холодну пору року протягом багатьох років після аварії на ЧАЕС були нетиповим явищем для ЗВ. Проте через зміну клімату зростає ймовірність створення сприятливих умов для природних пожеж. Тому на даний час необхідність відновлення комплексу протипожежних заходів у лісах Зони відчуження в повному обсязі є надзвичайно актуальною.

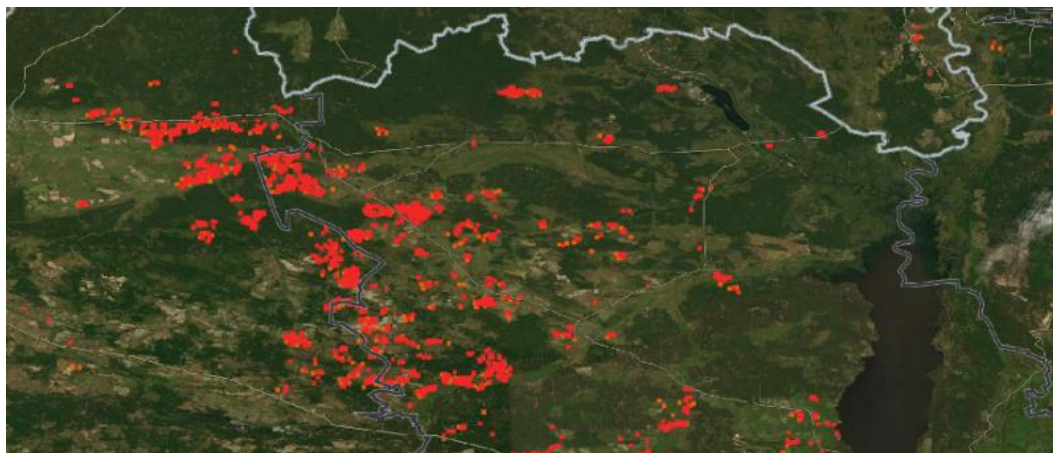


Рис. 1. Точки активного горіння в Київській області за період з 11 по 31 березня 2022 р. за даними [1].

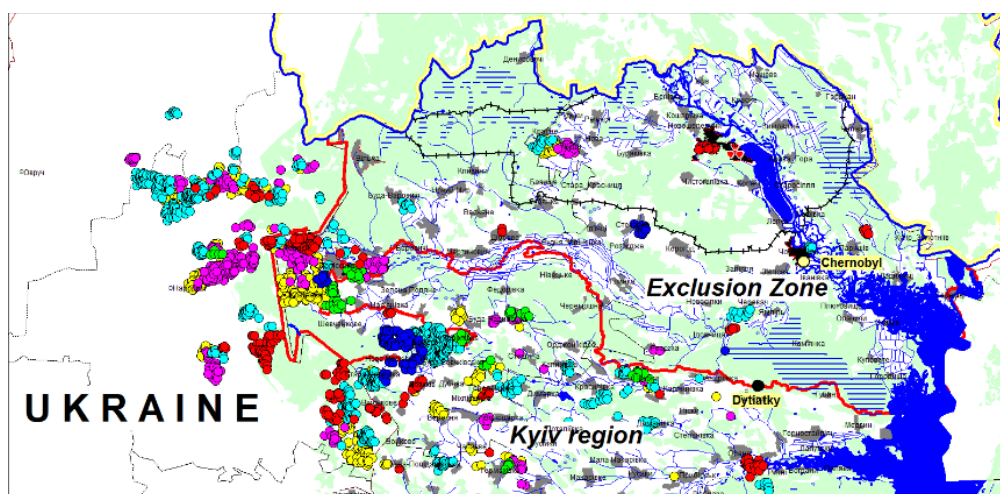


Рис. 2. Розташування основних районів пожеж в ЗВ та близько її границь: 11 березня (сині кола), 14-16 березня (зелені), 17-19 березня (фіолетові), 20-21 березня (жовті), 22-24 березня (блакитні) та 25-29 березня 2022 р. (червоні).

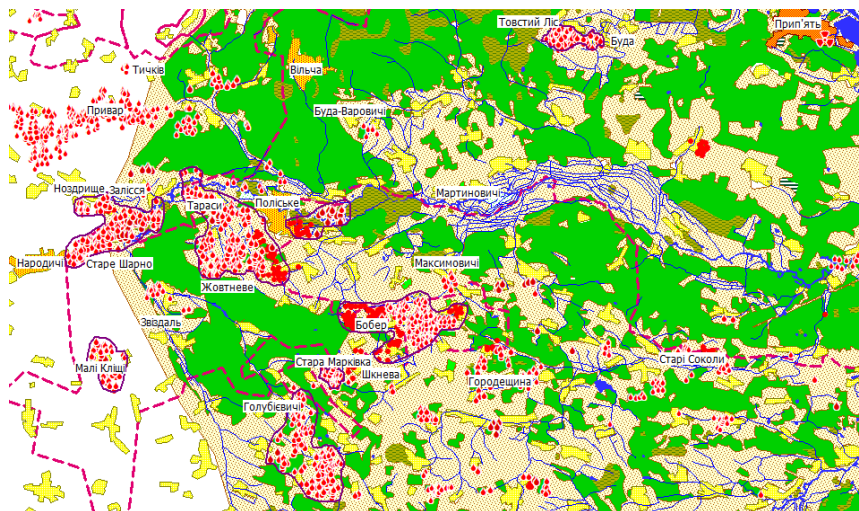


Рис. 3. Території пожеж 2022 р. на карті рослинного покриву.

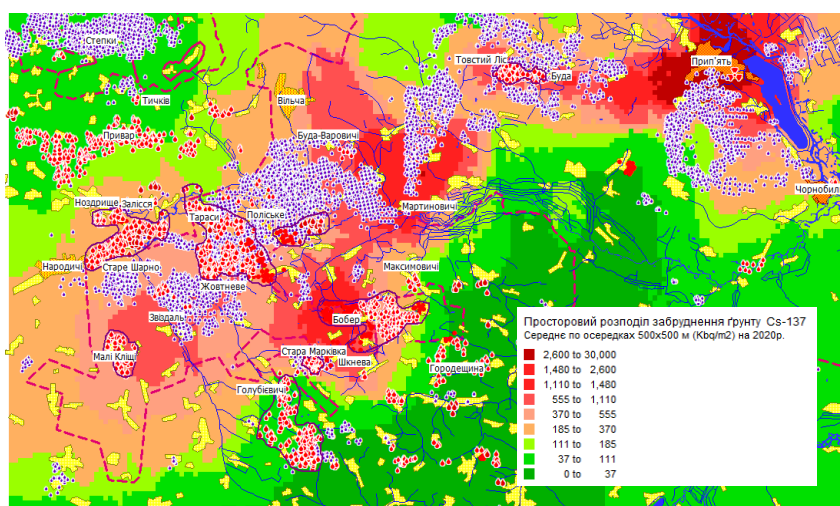


Рис. 4. Території пожеж 2020 р. (синім кольором) і пожеж 2022 р. (червоним кольором).

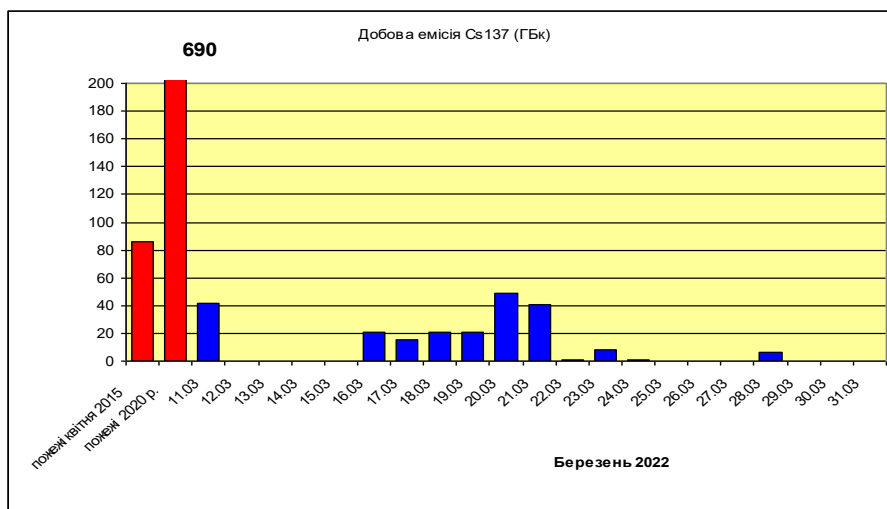
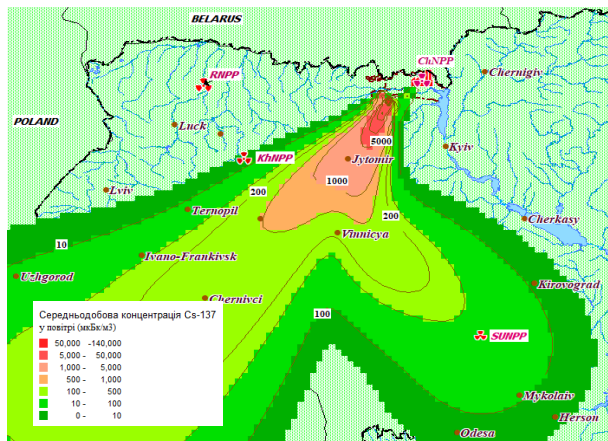
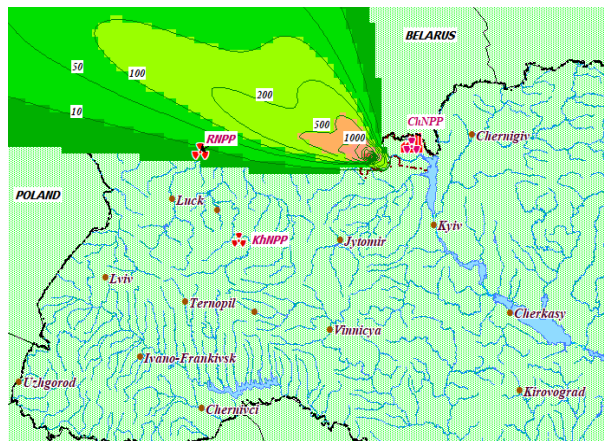


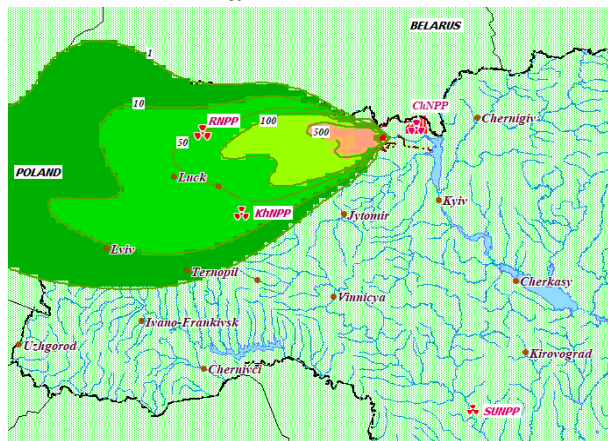
Рис. 5. Значення добової емісії активності  $^{137}\text{Cs}$  в атмосферу внаслідок пожеж в ЗВ з 11 по 31 березня 2022 р., а також значення сумарної емісії  $^{137}\text{Cs}$  при пожежах 2015 та 2020 рр.



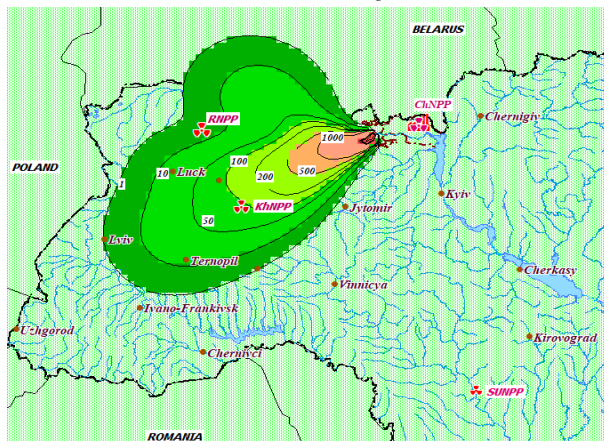
а



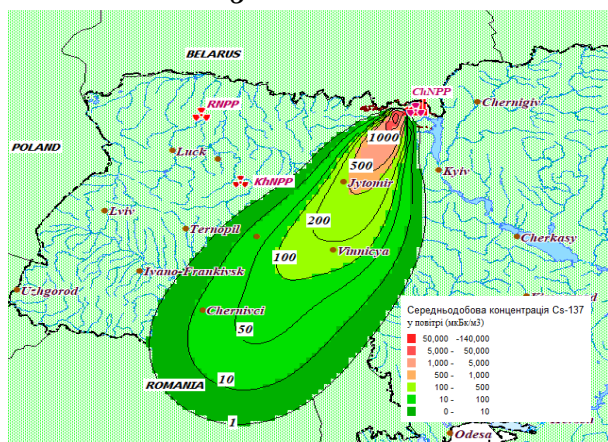
б



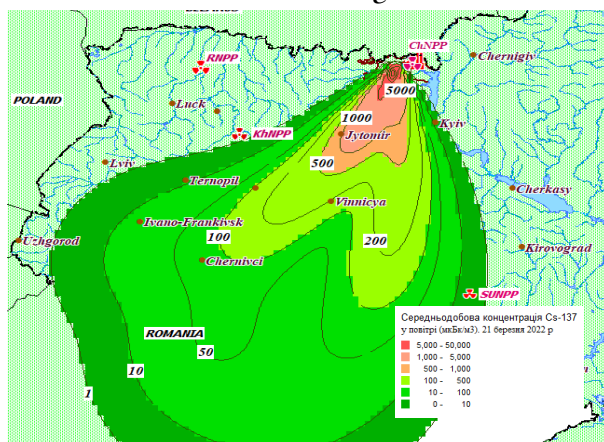
в



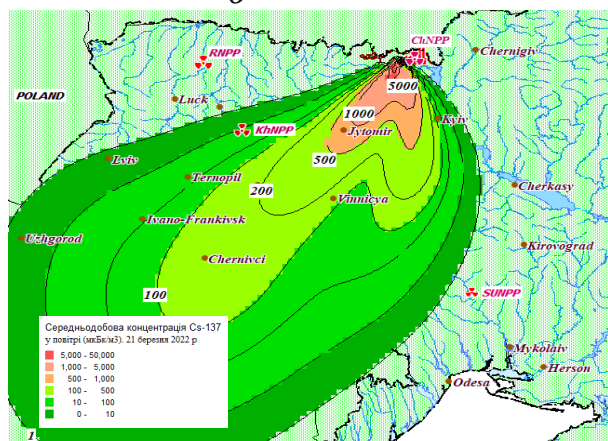
г



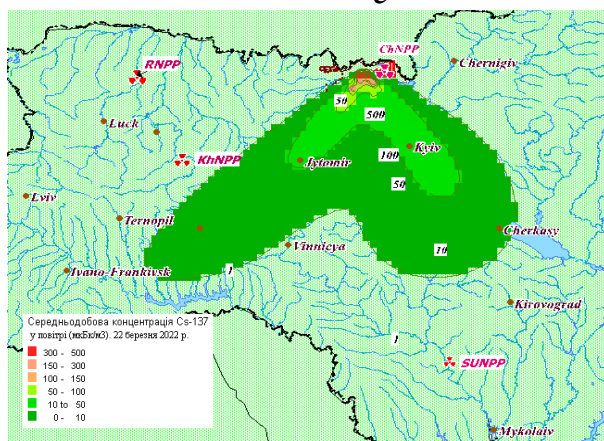
д



е



є



ж

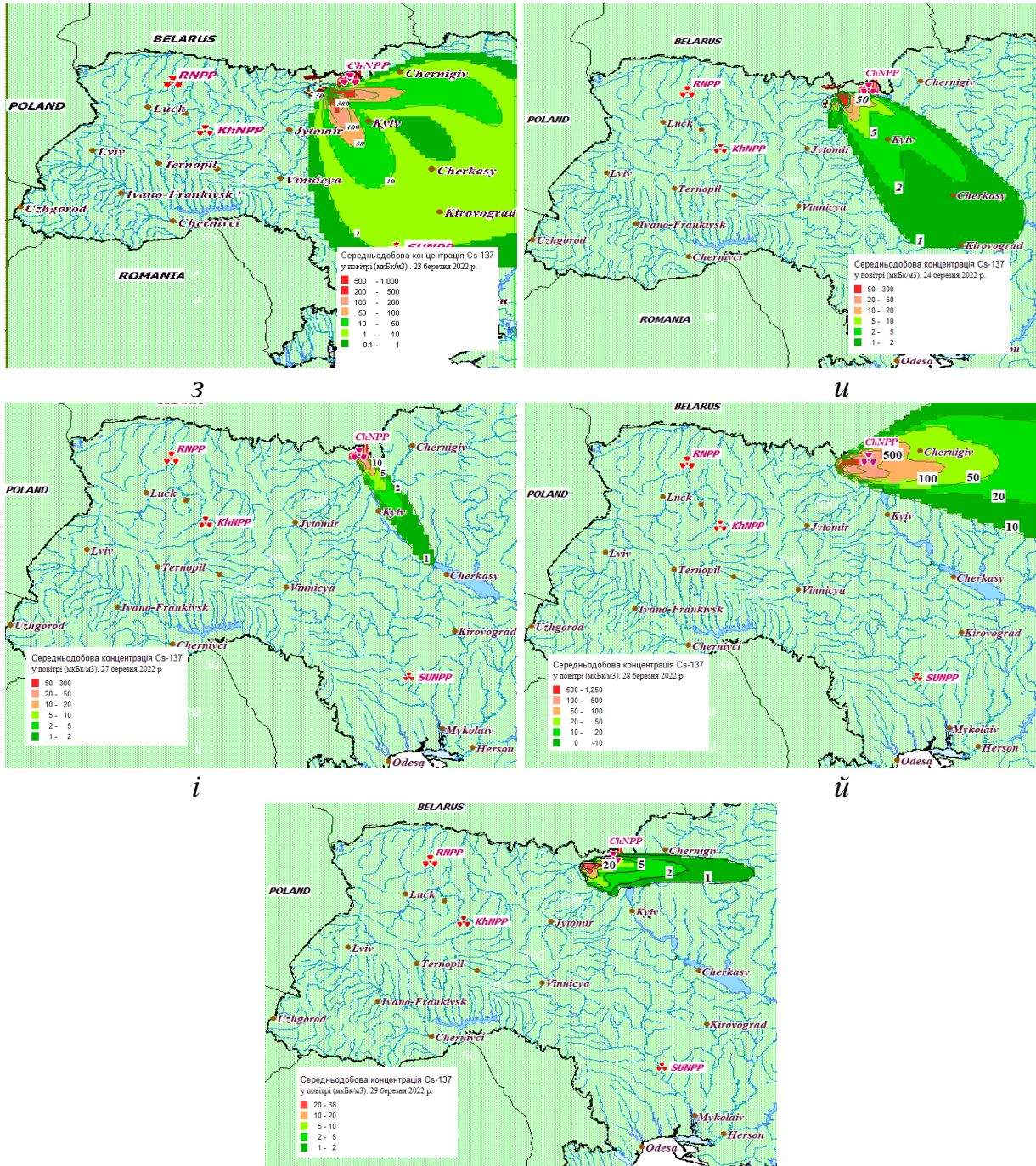


Рис. 6. Середньодобова концентрація активності  $^{137}\text{Cs}$  в приземному шарі повітря ( $\text{мкБк}/\text{м}^3$ ), обумовлена емісією продуктів горіння протягом 11.03 (а), 16.03 (б), 17.03 (в), 18.03 (г), 19.03 (д), 20.03 (е), 21.03 (є), 22.03 (ж), 23.03 (з), 24.03 (и), 27.03 (і), 28.03 (й), 29.03 (к) 2022 р.

### Література

1. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>
2. Моделювання атмосферного розповсюдження радіоактивності, винесеної в повітря в результаті лісових пожеж у зоні відчуження у квітні 2020 р. / М. М. Талерко, Т. Д. Лев, І. В. Ковалець, Ю. В. Яценко // Ядерна енергетика та довкілля. – 2020. – Вип. 3 (18). – С. 86-104.
3. Система численного прогноза погоди «WRF-Україна» / А. М. Гузий, І. В. Ковалець, А. А. Кушан [та ін.] // Математичні машини і системи. – 2008. – № 4. – С. 123 – 131.

## ДО ПИТАННЯ ПРО ОСНОВНІ НАПРЯМКИ МІГРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДІВ В ЗОНІ ЧАЕС

*Шинкаренко Віктор, Талерко Микола, Кашпур Володимир, Свирид  
Олександр*

Інститут проблем безпеки АЕС НАНУ, м. Київ,  
shynkarenko.viktor@gmail.com

**Abstract** Data on the state of contamination by radioactive aerosols of the surface layer of the atmosphere in the near zone of the Chernobyl nuclear power plant after the construction of the New Safe Confinement (NSC) are presented. An algorithm is proposed for estimating the  $^{137}\text{Cs}$  specific activity in the air depending on wind direction, based on data on the activities of air filters exposed for a long time. This makes it possible to identify the preferential directions of radioactive aerosols entering each of the four filter-ventilation units in the near zone of the Chernobyl nuclear power plant. The analysis of measurement data of  $^{137}\text{Cs}$  volumetric activities in the air outside the NSC and meteorological parameters indicates a significant contribution to the formation of radioactive aerosols by the winds of the northern group. It is assumed that the most likely reason for this is the influence of forest fires.

**Key words:** Shelter object, New Safe Confinement, volumetric activity of  $^{137}\text{Cs}$  in the air, forest fires.

### **Вступ**

Після закінчення первинної фази Чорнобильської аварії продовжували діяти такі джерела радіоактивного аерозолу як природний вітровий підйом пилових частинок із забрудненою підстильною поверхні землі, антропогенне забруднення за рахунок підйому пилу з забруднених доріг, будівельних майданчиків, забруднення за рахунок лісових пожеж та постійної емісії з об'єкта "Укриття" (ОУ) [1]. Зрозуміло, що вклад кожного з цих механізмів в формування аерозольної ситуації в ближній зоні ЧАЕС безперервно змінюється в залежності від метеорологічних умов (швидкості та напрямки вітру, наявності снігового покриву, вологості ґрунту тощо), виду, інтенсивності та місця проведення робіт. До побудови НБК рівень радіоактивних аерозолів в ближній зоні ЧАЕС переважно визначався або викидами з власне об'єкта Укриття, або з відповідних місць проведення робіт на території ближньої зони [2-8]. Після встановлення НБК відбулося зниження потоку в навколишнє середовище радіоактивних аерозолів від об'єкта «Укриття» що супроводжувалось відповідним ростом вкладу інших можливих джерел у формування радіоаерозольної ситуації в ближній зоні ЧАЕС. Оскільки детальний аналіз напрямків поширення радіоактивних аерозолів у ближній зоні та виявлення додаткових джерел їхніх надходжень не проводились, питання виявлення таких джерел залишається відкритим.

Визначення напрямків переважного перенесення радіоактивних аерозолів за даними вимірювань активності аерозольних фільтрів ускладнено тим, що

накопичення аерозольних часток на повітряному фільтрі відбувається протягом тривалого часу (7 діб) протягом якого напрямок вітру не залишається постійним. Обійти це ускладнення можна за допомогою статистичних методів для роботи з векторними величинами [9,10]. В роботі [10] була зроблена спроба проведення кореляційного аналізу середніх за час експозиції напрямків вітрів з активностями відповідних фільтрів. В результаті аналізу було показано, що після встановлення НБК об'єкт «Укриття» перестав грати роль домінуючого джерела радіоактивних аерозолів у ближній зоні. Тут потрібно відзначити, що під час процедури усереднення втрачається значна частина метеорологічної інформації, крім того використання усереднених напрямків вітрів є не завжди коректним, особливо у випадку сильної мінливості вітру під час експозиції повітряного фільтра.

Метою роботи є дослідження динаміки забруднення приземного шару атмосфери радіоактивними аерозолями в ближній зоні ЧАЕС та виявлення основних напрямків поширення таких аерозолів після завершення будівництва НБК протягом 2018-2019рр.

### Матеріали та методика експерименту

Відповідно до програми контролю радіаційного забруднення приземного шару атмосфери поблизу об'єкта «Укриття» протягом року працювали чотири фільтровентиляційні установки (ФВУ): ФВУ-1 «Ventmesa» – розташована на схід від санпропускника СП-1430 приблизно за 500 м від південно-західного кута машинного залу; ФВУ-2 «Тайфун» – знаходиться на відстані 1,4 км, біля адміністративного корпусу (АК) ОУ; ФВУ-3 «Град-1.8» була розміщена безпосередньо біля південної стіни машинного залу. Після монтажу об'єкта «Арка» ця ФВУ опинилась усередині НБК, де і продовжує працювати. ФВУ-4 «Град-1.0» розташована з північної сторони 4-го енергоблоку. Основні параметри ФВУ наведені в табл. 1, на рис. 1 приведена схема їхнього розташування. Матеріал повітряних фільтрів – тканина Петрянова ФПП-15-1,5. Періодичність зміни фільтрів 7 діб.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики ФВУ

Параметри ФВУ	ФВУ-1 «Ventmesa»	ФВУ-2 «Тайфун»	ФВУ-3 «Град-1.8»	ФВУ-4 «Град-1.0»
Широта місцезнаходження	51°23'13.0"	51°23'39.9"	51°23'17.9"	51°23'26.8"
Довгота місцезнаходження	30°05'31.4"	30°04'50.8"	30°05'52.4"	30°06'09.2"
Висота відбирання проби, м	1,0	2,5	1,8	1,0
Продуктивність, м <sup>3</sup> /год	300	4500	450	450
Площа фільтра, м <sup>2</sup>	0,36	0,78	0,56	0,56

Вимірювання активності <sup>137</sup>Cs на повітряних фільтрах проводили за допомогою напівпровідникового гамма-спектрометра.

Аналіз погодних умов розповсюдження радіоактивних аерозолів проводили за даними міні-метеостанції ІПБ АЕС НАН України CR-10, розташованої на даху адміністративного корпусу об'єкта «Укриття». Основні метеорологічні параметри (напрямок і швидкість вітру, температура, вологість повітря, опади) осереднювалися і запам'ятовувалися по 10-хвилинних інтервалах.

Статистичний аналіз проводили за допомогою пакетів Excel та Statistica-6.

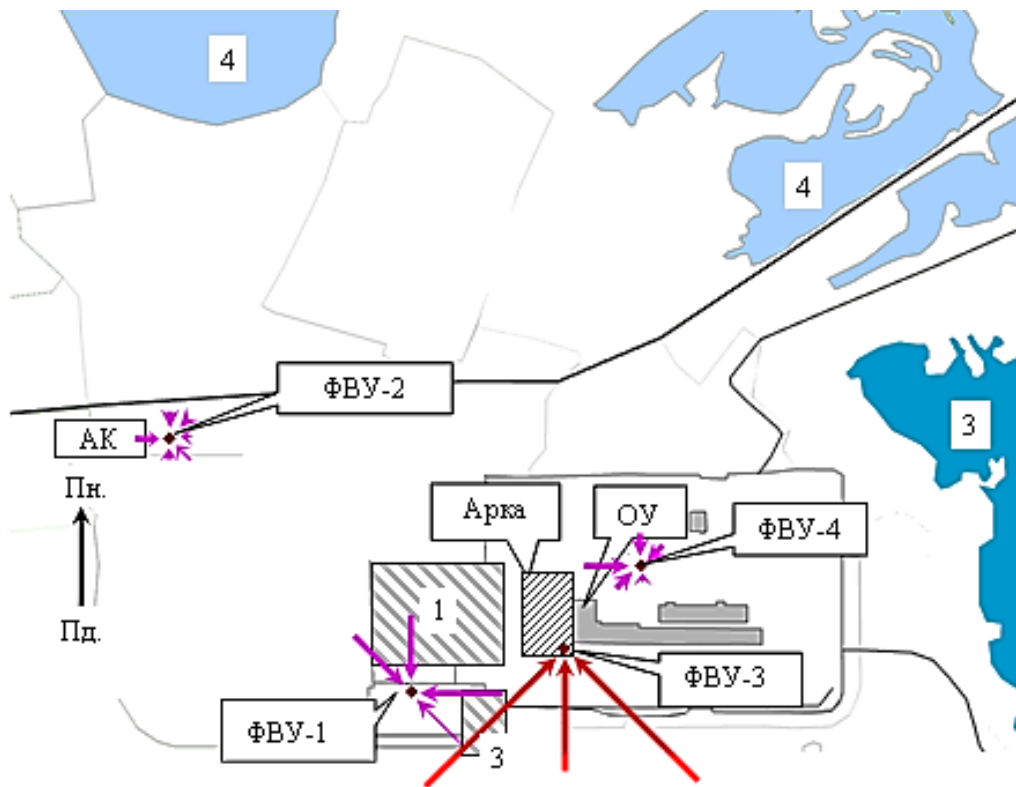


Рис. 1. Схема розташування ФВУ в ближній зоні об'єкта «Укриття».

1. Основний промисловий майданчик;
2. Допоміжний промисловий майданчик;
3. Залишки ставка охолоджувача;
4. Інші водойми.

Довжини стрілок поблизу ФВУ пропорційні величинам середніх питомих активностей  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі для вітрів відповідних напрямків, а їхня товщина - рівню достовірності (див. далі по тексту табл. 3)  
Для ФВУ-3 (червоні стрілки) масштаб зменшено в 100 раз.

### Динаміка активності РА в ближній зоні ОУ

Питомі активності  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі поблизу ФВУ, розташованих в ближній зоні ОУ представлені на рис. 2. Відзначимо, що на ФВУ, розташованих поза межами НБК, спостерігається суттєве зниження об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  в порівнянні з роками до будівництва НБК і особливо з періодом будівництва самого НБК [8]. У той же час активність  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі під накриттям НБК внаслідок виконання робіт з демонтажу радіоактивно забруднених об'єктів залишалася досить високою

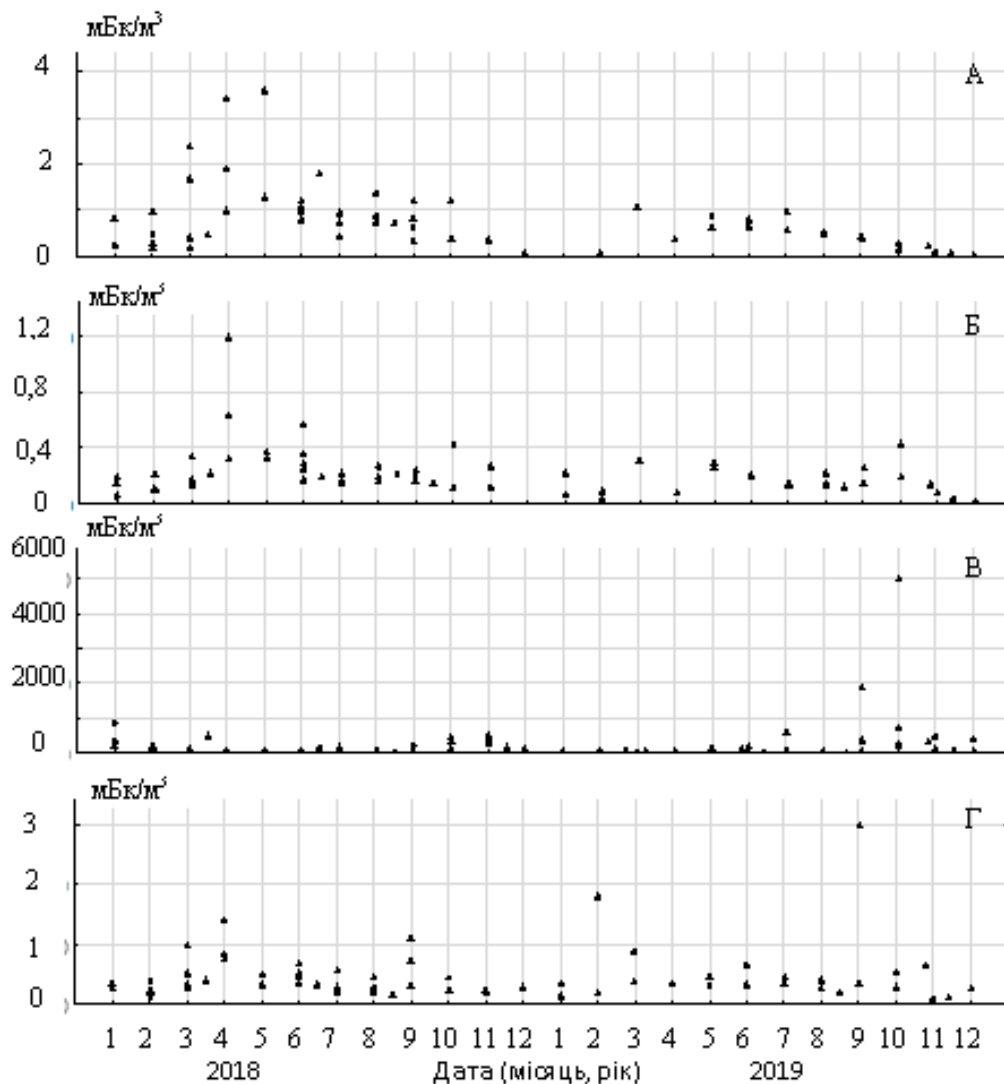


Рис. 2. - Динаміка об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  в приземному шарі повітря поблизу ОУ протягом 2018 - 2019 рр.  
 А – ФВУ-1 “Ventmeca”; Б – ФВУ-2 “Тайфун”;  
 В – ФВУ-3 “Град-1.8”; Г – ФВУ-4 “Град-1.0”

### Знаходження середньої питомої активності $^{137}\text{Cs}$ в повітрі вітрів різних румбів

Як уже було зазначено вище, визначення напрямків переважного перенесення радіоактивних аерозолів та оцінка усередненої за часом об'ємної активності радіонуклідів в повітрі за даними вимірювань активності аерозольних фільтрів ускладнено тим, що накопичення аерозольних часток на повітряному фільтрі відбувається протягом тривалого часу (7 діб) протягом якого напрямок вітру не залишається постійним. Нижче наводимо алгоритм проведення такої оцінки.

В ході попереднього обробітку метеорологічної інформації було проведено її усереднення по 3-годинних інтервалах. (Середню швидкість вітру та її напрям знаходили за правилами дії з векторними величинами). У відповідності до азимута середньої швидкості вітру кожного з тригодинних інтервалів був поставлений відповідний румб та його номер згідно табл. 2.



**Таблиця 2. Азимутальні кути та вибрані номери румбів**

Румб	<i>N</i>	<i>NE</i>	<i>E</i>	<i>SE</i>	<i>S</i>	<i>SW</i>	<i>W</i>	<i>NW</i>
Азимутальні кути, град.	[337.5, 22.5]	[22.5, 67.5]	[67.5, 112.5]	[112.5, 157.5]	[157.5, 202.5]	[202.5, 247.5]	[247.5, 292.5]	[292.5, 337.5]
Номер румба, <i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8

Розглянемо один окремий випадок вимірювання питомої активності радіонукліду, в нашому випадку  $^{137}\text{Cs}$ , в повітрі. Протягом часу експозиції  $t_{exp}$  ФВУ прокачує певний об'єм повітря  $Q$ , при цьому на фільтрі накопичується активність  $A_f$ . Відповідно, одержана питома активність  $A_{\text{мрт}} = A_f / Q$ . Кожну з експозицій повітряних фільтрів будемо характеризувати набором румбів діючих під час експозиції вітрів. Скориставшись таблицею метеоданих, підрахуємо для кожної окремо взятої експозиції число вітрів кожного з румбів -  $n_i$ , де  $i$  – номер відповідного румба. Тобто, кожній з експозицій поставимо у відповідність набір з 8 чисел, що відповідають набору діючих вітрів (деякі з цих чисел можуть бути нулями).

Знехтуємо змінами питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі для вітрів кожного з румбів протягом часу експозиції фільтра, тобто будемо вважати, що питома активність в повітрі для вітрів даного румба є постійною протягом цього часу. Позначимо шукану питому активність в повітрі за наявності вітру  $i$ -того румба через  $a_i$ . Відповідно, така ж питома активність  $a_i$  буде на вході пробовідбірника ФВУ протягом дії вітру даного румба. При цьому на фільтрі за час  $t_i$  буде відкладено активність  $A_i$

$$A_i = a_i \cdot t \cdot W = 3a_i \cdot n_i \cdot W, \quad (1)$$

де  $t_i$  – час дії вітрів даного румба,  $n_i$  – число тригодинних інтервалів протягом яких діяли вітри даного румба,  $W$  – продуктивність прокачування повітря через ФВУ. В першому наближенні будемо вважати  $W$  сталою для даної установки (див. табл. 1). (прим\_1)

Знайдемо суму вкладів вітрів (1) усіх румбів в активність  $A_f$  на фільтрі:

$$\sum_1^8 A_i = A_f = \sum_1^8 3a_i \cdot n_i \cdot W = 3W \sum_1^8 a_i \cdot n_i \quad (2)$$

Звідки

$$\sum_1^8 a_i \cdot n_i = \frac{A_f}{3W} = \frac{A_{\text{мрт}} \cdot Q}{3W} = \frac{A_{\text{мрт}} \cdot W \cdot t}{3W} = \frac{A_{\text{мрт}} \cdot W \cdot 3 \sum_1^8 n_i}{3W} = A_{\text{мрт}} \cdot \sum_1^8 n_i, \quad (3)$$

де  $Q$  – прокачаний через фільтр об'єм повітря,  $t$  – час експозиції фільтру.

Отже, для кожної експозиції фільтрів ФВУ в загальному випадку маємо рівняння з восьми невідомими питомими активностями  $a_i$  вітрів різних румбів.

Відповідно для  $N$  вимірів у даному пункті отримуємо систему з  $N$  рівнянь, наближений розв'язок якої дає значення  $a_i$  - усереднених протягом виконання вимірів питомих активностей  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі для кожного з румбів. Знаходження розв'язків систем рівнянь проводили в середовищі пакету *Statistica-6*. Окрім знаходження значень  $a_i$  пакет *Statistica* дозволяє також оцінити рівень достовірності отриманих коефіцієнтів, тобто визначає рівень їхньої надійності.

### **Середні питомі активності $^{137}\text{Cs}$ в повітрі вітрів різних румбів в зоні ОУ**

Перш за все відмітимо, що реальний процес накопичення активності на фільтрі є більш складним, особливо якщо врахувати специфіку ближньої зони ОУ. Окрім розглянутого перенесення з вітром наявні також потужні випадкові чинники антропогенного характеру, обумовлені насамперед проведенням робіт, рухом автотранспорту, а також лісовими пожежами. Викликані ними значні підвищення активності на фільтрі ФВУ здатні дати вагомий внесок в середню питому активність напрямку вітру з яким співпав по часу даний викид. Подібні викиди добре простежуються на рис. 2. Звичайно, ці значення досить легко виключити з розгляду, але питання про визначення граничного рівня, вище якого починаються власне викиди залишається відкритим. Більше того, величина цього рівня залежить також і від мети проведення дослідження. Так, обумовлені лісовими пожежами значення  $A_{\text{пит}}$  слід виключати з розгляду як викиди при дослідженні генерації радіоактивних аерозолів в ближній зоні ОУ, але вони ж будуть предметом аналізу при вивченні впливу лісових пожеж на забрудненість повітря радіонуклідами у цій зоні.

В таблиці 3 наведені результати розрахунків об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  у повітрі в залежності від напрямку вітру для ФВУ 1 - 4 по рокам, а також середніх значень об'ємної активності за два роки. Тут же наведені результати аналогічних розрахунків за умови відкидання викидів. Значення об'ємних активностей додатково позначені кольором та розміром шрифту в залежності від їхнього рівня достовірності:  $p > 0.95$ ,  $0.95 > p > 0.9$ ,  $0.9 > p > 0.8$ ,  $0.8 > p > 0.5$ . Значення з достовірністю  $p < 0.5$  опущені, як несуттєві. Окремо приведено число рівнянь  $n$ . На рис. 1 відповідні значення об'ємних активностей  $^{137}\text{Cs}$  у повітрі, що були одержані за умови відкидання викидів, зображені у вигляді стрілок відповідного напрямку, довжина яких пропорційна активності.

З таблиці 3 бачимо, що вітри північної групи спрямування характеризуються надходженням повітря з підвищеними рівнями об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  для ФВУ 1, 2 та 4. І якщо в якості джерела таких підвищених рівнів для ФВУ-1 цілком вірогідно розглядати будівлю ОУ, то для ФВУ-2 та ФВУ-4 таке пояснення не спрацьовує, оскільки вони розташовані північніше від ОУ (див. рис. 1). Видалення екстремальних точок призводить до зниження рівнів активності вітрів північної групи, що свідчить про переважний зв'язок відкинутих значень з вітрами цієї ж групи. Тобто, північні вітри характеризуються підвищеними об'ємними активностями і з цими ж вітрами пов'язані також і екстремальні значення об'ємних активностей. Такі коливання

величин об'ємних активностей можуть бути пояснені дією двох механізмів – ресуспензією радіонуклідних забруднень в північній частині зони та/або впливом лісових пожеж. Але з рис. 2 видно, що максимуми сезонних коливань середніх значень питомих активностей припадають на літні місяці, що не узгоджується з механізмом ресуспензії, на заваді роботи якого виступає вкрита рослинністю підстильна поверхня. Отже, більш вірогідно припустити, що підвищені рівні середньої об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі вітрів північного спрямування є наслідком лісових пожеж.

**Таблиця 3. Середні об'ємні активності  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі в залежності від напрямку вітрів, мБк/м<sup>3</sup>**

№ ФВ У	Роки	Напрямки вітру								n	Рівень відкиданн я викидів $A_{\text{пит}}$ , мкБк/м <sup>3</sup>
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
1	2018	2.18		3.06		0.99		1.08		40	
	2019	0.75	0.44	3.37				0.42	1.31	20	
	2018-2019	1.47		2.71	0.81			0.99		60	
	2018	1.47		1.68		0.67		0.61		34	1200
	2019	0.75	0.34	3.10				0.52	0.53	16	800
	2018-2019	0.98	0.32	1.25	0.95			0.53	1.05	49	1200
2	2018	0.71				0.35		0.27		40	
	2019	0.21			0.48		0.31	0.34		26	
	2018-2019	0.43			0.58	0.11		0.44		66	
	2018	0.20	0.25	0.19		0.37		0.37		36	400
	2019	0.24		0.87			0.17	0.35		24	400
	2018-2019	0.25	0.16	0.18	0.32	0.16	0.07	0.37		60	400
3	2018					259	593			46	
	2019					609				44	
	2018-2019					431	486			90	
	2018			162		313	357			44	500
	2019		90		283	126	193			40	500
	2018-2019		107		266	172	278			84	500
4	2018	1.20		0.37		0.65		0.76		40	
	2019			3.72			0.90			24	
	2018-2019	0.85			1.50		0.66	0.58		65	
	2018	0.29	0.33	0.23		0.40	0.22	0.73	0.29	33	600
	2019	0.37	0.34				0.45	0.67		19	600
	2018-2019	0.35	0.35	0.18	0.21	0.16	0.35	0.68	0.19	52	600

Позначення достовірності:  $p > 0.95$ ,  $0.95 > p > 0.9$ ,  $0.9 > p > 0.8$ ,  $0.8 > p > 0.5$ .

Зазначимо, що щорічне підвищення об'ємної активності аерозолів у повітрі під час пожежонебезпечного сезону відзначається в роботах багатьох дослідників [11-13]. Так, в [11] було вказано на достовірне збільшення об'ємної активності довгоживучих радіонуклідів у повітрі в літні місяці на території Швеції, в роботах [12-13] – на території Білорусії.

**Висновки.** Після встановлення арки НБК у проектне положення в ближній зоні об'єкта «Укриття» спостерігається зменшення рівня забруднення приземного шару повітря, незважаючи на те, що внаслідок проведення монтажних робіт питомо активність повітря під накриттям НБК залишається досить високою.

Запропонований метод для обчислення наближених значень середніх активностей радіонуклідів у повітрі в залежності від напрямку вітру, виходячи з даних метеорологічних спостережень та величин активностей фільтрів ФВУ, експонованих протягом тривалого часу.

Показано, що вітри північного спрямування на території ближньої зони ЧАЕС характеризуються підвищеними рівнями середньої та пікової активності  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі. Висловлено припущення, що найбільш вірогідною причиною такого підвищення є вплив лісових пожеж.

*Прим\_1 (Продуктивність ФВУ залежить від ряду факторів, насамперед від опору фільтра для повітряного потоку – в кінці експозиції продуктивність дещо знижується. Сильне зниження продуктивності спостерігається за несприятливих метеорологічних умов – туман, дрібний дощ, сніг. В більш нових приладах задана продуктивність підтримується автоматично)*

#### **Перелік посилань**

1. Гаргер Е. К. Физико-химические характеристики аэрозоля 30-километровой зоны ЧАЭС в 1986 - 2013 гг. / Е. К. Гаргер, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк, В. К. Шинкаренко // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2014. — Вип. 23. — С. 54–65.

2. Гаргер Е. К. Характеристика аэрозоля неорганизованных выбросов объекта “Укрытие” / Е. К. Гаргер, В. А. Кашпур, А. Д. Саженюк, Г. Г. Скоряк, Гора, Курочкин. // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2004, вип.1. С. 125-137.

3. Огородников Б. И. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986 - 2006 гг. / Б. И. Огородников, Э. М. Пазухин, А. А. Ключников. // Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2008. — 456 с.

4. Шинкаренко В. К. Результаты исследований аэрозольных фильтров, экспонированных до, во время и после разрушения крыши машинного зала 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС / В. К. Шинкаренко, В. А. Кашпур, Г. Г. Скоряк // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2014.- в.23. - С. 45-53.

5. Огородников Б. И. Состав и свойства радиоактивных аэрозолей объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС:2000 - 2015 гг. / Б. И. Огородников // Журнал физической химии. — 2018. - Т. 92, № 6. - С. 1006–1017.

6. Шинкаренко В. К. Оценка аэрозольной радиационной обстановки на промплощадке ЧАЭС во время проведения работ по строительству НБК / В. К. Шинкаренко, В. А. Кашпур, Г. Г. Скоряк, А. К. Калиновский // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2016. — Вип. 27. — С. 58–66.

7. Garger E. K. Assessment of aerosol radiation environment in short-rangeregion of ChNPP during building of the new safe confinement / E. K. Garger, V. K. Shynkarenko, V. A. Kashpur [et al.] // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2017. — Вип. 29. — С. 78–84.

8. Шинкаренко В. К. Новий безпечний конфайнмент і радіоактивні аерозолі в ближній зоні Чорнобильської атомної електростанції. / В. К. Шинкаренко, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк, О. А. Свирид. // Ядерна енергетика та довкілля. №1 (13) 2019. – С. 76-82.

9. Mardia K. V. Directional Statistics / K. V. Mardia, P. E. Jupp. — Chichester: Wiley, 2000. — 441 p.

10. Шинкаренко В. К. Радіоактивні аерозолі в ближній зоні Чорнобильської атомної електростанції в 2018 році. В. К. Шинкаренко, М. М. Талерко, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк, О. А. Свирид. // Ядерна енергетика та довкілля. №1 (16) 2020. – С. 57-67.

11. Kulan, A. Seasonal  $^7\text{Be}$  and  $^{137}\text{Cs}$  activities in surface air before and after the Chernobyl event / A. Kulan // J. Environm. Radioactivity. – 2006. – vol. 90. – pp. 140-150.

12. Дворник А. М. Лесные пожары в зонах радиоактивного загрязнения / А. М. Дворник, А. А. Дворник // *Эко-потенциал* № 2 (14), 2016, С.7-11.

13. Дворник А. М. Динамика содержания  $^{137}\text{Cs}$  в поверхностном воздухе в пожароопасный сезон / А. А. Дворник, Ю. В. Дворник // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук*. 2016. № 4. С. 66.

ДЛЯ ПОДАТОК

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**VII Міжнародна конференція**

**ПРОБЛЕМИ ЗНЯТТЯ  
З ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ  
ТА ВІДНОВЛЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

**Seventh International Conference  
on Nuclear Decommissioning  
and Environment Recovery  
INUDECO 22**

**(27–28 квітня 2022 року, м. Славутич)**

**Збірник матеріалів**

Комп'ютерна верстка і макетування

К. П. Гузь

Підписано до друку 18.02.2022  
Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. – 7,26.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 4/23.

---

Редакційно-видавничий відділ Чернігівського національного технологічного університету  
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,  
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції  
серія ДК № 4802 від 01.12.2014 р.